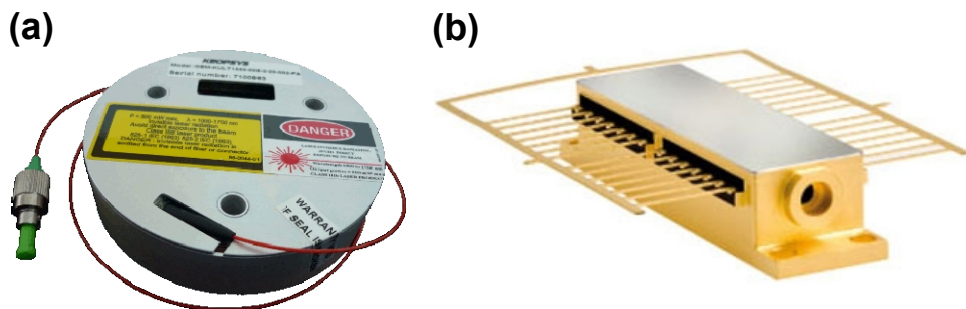


2.3 Kustannustehokkaat pumppuvalonlähteet

Pumppulaserin valinta on yleensä ensimmäinen vaihe käytännön superjatkumovalonlähteen suunnittelussa. Pumppulaserin valinnan jälkeen epälineariselta kuidulta vaadittavat parametrit lasketaan pumppulaserin tuottamille pulsseille halutunlaisen superjatkumon aikaansaamiseksi. Suurin osa superjatkumovalonlähteen tieteellisestä tutkimuksesta on tehty käyttämällä laboratoriokäyttöön tarkoitettuja lasereita, joista tärkeimpänä esimerkkinä on aallonpituussäädettävä muotolukittu titaani-safiiri-laser, jonka ulostulosäde fokusoidaan optiseen kuituun. Käytännön sovelluksissa on kuitenkin järkevää pyrkiä käyttämään pienikokoisia ja kustannustehokkaita valonlähteitä, joiden ulostulo on valmiiksi kuitumuotoinen. Tällöin epälineaarinen kuitu voidaan liittää suoraan ulostulokuituun joko mekaanisesti tai hitsaamalla kuidut yhteen. Näin vältetään vapaasädeoptiikkaan liittyviltä ongelmilta, kuten laitteiston jatkuvan uudelleenlinjauksen tarpeelta. Kokonaan kuitupohjainen laitteisto on myös edullisempi valmistaa, ja se on lisäksi epäherkkä ympäristön vaikutuksille, kuten lämpötilavaihteluille, pölylle ja värinälle.

Tässä aliluvussa esitellään kaksi rakenteeltaan hyvin erilaista lasertyyppiä, jotka täyttävät edellä esitetyt vaatimukset liittyen pieneen kokoon, kustannustehokkuuteen ja kuitumuotoiseen ulostulostuloon. Nämä ovat pulssitettu kuitulaser ja Q-kytketty mikrosirulaser. Kuvassa 8 on esitetty valokuvat työssä käytetystä kuitulaserista (a) sekä pienikokoisesta mikrosirulaserista (b).



Kuva 8. (a) Keopsys Kult -kuitulaser (www.keopsys.com) ja (b) Innolight μ Flare -mikrosirulaser (www.innolight.de).

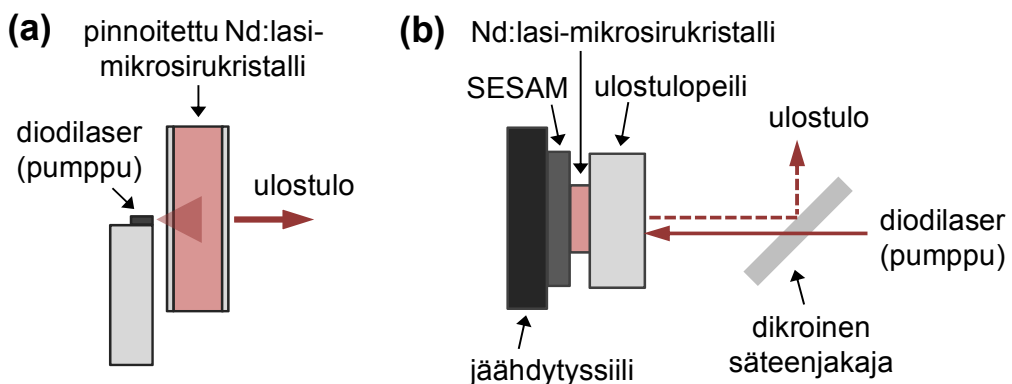
2.3.1 Mikrosirulaserit

Mikrosirulaser on kiinteän olomuodon laser, jonka laserkristalli on suorassa kontaktissa resonaattoripeilien kanssa. Monoliittisesta rakenteesta (esitetty kuvassa 9 (a)) johtuen laserresonaattori ei vaadi linjausta ja sen valmistuskustannukset voidaan pitää pieninä. Tasapäätyisen resonaattorin stabiilius saadaan yleensä aikaan lämpölinssi-ilmiön avulla, ja pumppaamalla diodilaserilla resonaattorin fundamentaalimuotoa saadaan stabiili ja poikittaissuunnassa yksimuotoinen ulostulosäde. Stabiili ja yksimuotoinen säde mahdollistaa yksimuotokuidun liittämisen suoraan laserulostuloon. Muihin mikrosirulaserin etuihin lukeutuu muun muassa resonaattorin lyhydestä (tyypillisesti alle 1 mm) aiheutuva suuri vapaa spektrinen matka, minkä vuoksi mikrosirulaser toimii lähes aina myös pitkittäissuunnassa yksimuotoisena. Tämä parantaa pulssien huipputehon stabiiliutta

huomattavasti, millä on suuri merkitys superjatkumon pulssista pulssiin -stabiiliuteen. Resonaattoriin voidaan helposti liittää vahvistuskristallin lisäksi myös muita komponentteja kuten epälineaarinen kristalli tai saturoituva absorboija. Mikrosirulaserille tyypillinen ulostuloteho on kymmenistä satoihin milliwatteihin, mutta myös muutamien wattien malleja on saatavilla. (Paschotta, 2011)

Yleisimmät mikrosirulaserissa käytetyt laserkristallit ovat Nd:YAG ja Nd:YVO₄, ja tyypillisin emissioaallonpituus on 1064 nm, mutta myös 1320, 1122 ja 946 nanometrin emissioaallonpituudet ovat mahdollisia. Erbiumilla seostetun kristallin käyttö mahdollistaa silmäturvallisen 1550 nanometrin emissioaallonpituuden, usein kuitenkin pienemmällä teholla kuin mitä on saatavilla vastaavista kuitulasereista. Mikrosirulaserin rakenne soveltuu hyvin tehokkaaseen kaviteetin sisäiseen taajuuden tuplaukseen (tai triplaukseen) epälineaarisen kiteen avulla, minkä vuoksi muun muassa 532, 355 ja 266 nanometrin aallonpituuksilla emittoivia lasereita on myös laajasti saatavilla.

Lyhyen kaviteetin ansiosta Q-kytketyllä mikrosirulaserilla aikaansaadaan muita Q-kytkettyjä lasertyyppisiä lyhyempiä pulsseja; pulssin pituus voi lyhyimmillään olla alle sata pikosekuntia. Passiivinen Q-kytkentä voidaan toteuttaa esimerkiksi kuvassa 9 (b) esitetyllä rakenteella, jossa pumppulaser kytketään noin 200 mikrometriä pitkään laserkaviteettiin dikroisen säteenjakajan kautta. Toisena laserpeilinä voi toimia joko SESAM-peili (eng. semiconductor saturable absorber mirror) tai kromilla seostettu saturoituva absorboija, kuten Cr:YAG-kristalli. Passiivisesti Q-kytketty mikrosirulaser voi tuottaa pienienergisiiä pulsseja satojen kilohertsien toistotaajuudella tai vaihtoehtoisesti, ja superjatkumon generoimisen kannalta mielenkiintoisemmin, nanosekuntipulseja, joiden huipputeho on useita kilowatteja. Q-kytkentä voidaan toteuttaa myös aktiivisesti käyttämällä resonaattorin sisällä Pockels-kennoa. Tällöin käyttäjä voi kontrolloida sekä pulssienergiaa että pulssien syntyhetkeä, mikä ei ole mahdollista passiivisesti Q-kytketyllä laserilla. (Spühler, 1999)



Kuva 9. (a) Yksinkertaisen jatkuvatoimisen mikrosirulaserin rakenne (b) Passiivisesti Q-kytketyn mikrosirulaserin rakenne (Spühler, 1999).

2.3.2 Kuitulaserit

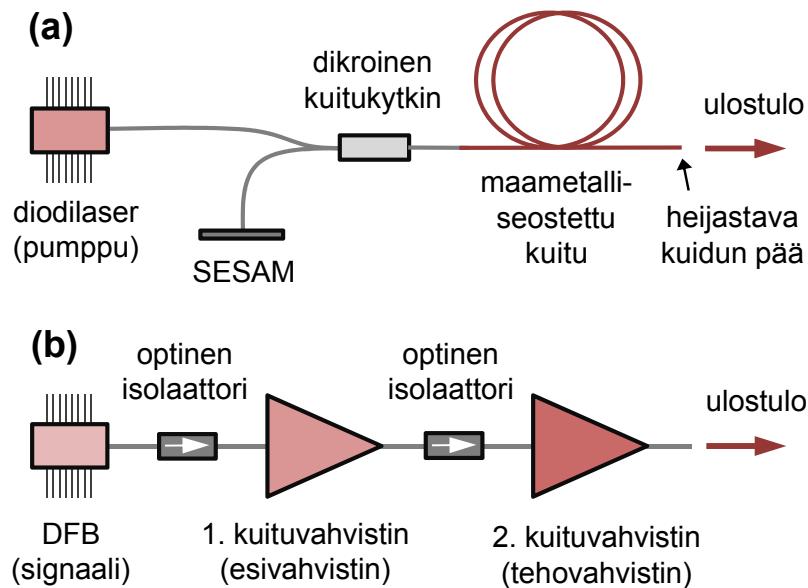
Kuitulaserilla tarkoitetaan laseria, jossa optinen vahvistus tapahtuu kuidussa. Kiinteän olomuodon lasereihin verrattuna kuitulaserin etuja ovat liikuteltava kuitumuotoinen ulostulo, pienet valmistuskustannukset, mekaanisen värinän sietokyky, diffraktiorajoitettu säteenlaatu, suuri vahvistushyötysuhde, joka mahdollistaa pienen pumpputehon ja vaikeiden lasertransitioiden hyväksikäytön, sekä amorfiselle väliaineelle ominainen leveä vahvistuskaista. Kuitulaserin heikkouksina voidaan pitää muun muassa suunnittelukustannuksia, jotka ovat yleensä kiinteän olomuodon laseria suuremmat sekä polarisoidun ulostulosäteen tuottamisen vaikeutta. Lisäksi kuidun pienestä poikkipinta-alasta johtuva suuri epälineaarisuus rajoittaa korkeinta saavutettavaa pulssin huipputehoa. (Paschotta, 2011) Kuitulaserit ovat kehittyneet valtavasti viimeisen kymmenen vuoden aikana, ja niitä on kirjoitushetkellä saatavilla monille eri aallonpituusalueille, jatkuvatoimisena tai pulssitettuna, ulostulotehon ulottuessa milliwateista kilowatteihin. Kustannustehokkaan superjatkumon luomisessa kiinnostavimpina voidaan pitää nanosekuntipulsseja tuottavia Q- tai vahvistuskytkettyjä kuitulasereita sekä passiivisesti muotolukittuja piko- tai femtosekuntipulsseja tuottavia kuitulasereita.

Minkä tahansa laserin kolme pääkomponenttia ovat vahvistusväliaine, pumppausjärjestelmä ja optinen resonattori. Kuitulaserin tapauksessa vahvistusväliaineena toimii optinen kuitu, jota on seostettu maametalli-ioneilla, kuten erbium (Er^{3+}), neodyymi (Nd^{3+}), ytterbium (Yb^{3+}), tulium (Tm^{3+}) tai praseodyymi (Pr^{3+}) -ioneilla. Teknologisesti merkittävimpiä näistä ovat erbium, ytterbium ja tulium, joiden eniten hyödynnetyt emisiot ovat järjestyksessä $1,5 \mu\text{m} - 1,6 \mu\text{m}$, $1,0 \mu\text{m} - 1,1 \mu\text{m}$, ja $0,8 \mu\text{m}$ aallonpituusalueilla. (Tanabe, 2002) Koska vahvistusväliaineena toimii optinen kuitu, pumppuvalonlähteen säteen tulee olla hyvälaatuinen. Tämän vuoksi kuitulasereita pumpataan lähes poikkeuksetta yhdellä tai useammalla kuitukytketyllä laserdiodilla. Suuritehoisten kuitulaserien tapauksessa pumppaus ei kohdistu kuidun kapeaan ytimeen, vaan kuorikerrokseen (eng. cladding). Näin voidaan käyttää monimuotoisia diodilasereita sekä suurempia pumpputehoja kuin mitä kapea ydin itsessään kestäisi. Laserresonaattori saadaan aikaan esimerkiksi liittämällä peilit kuidun päätyihin, pinnoittamalla kuidun päädyt kemiallisella höyrydepositiolla tai valottamalla kuidun päätyihin heijastavat Braggin hilat. Joissain tapauksissa pelkkä Fresnel-heijastus kuidun päästä riittää takaisinkytkennäksi. (Pask, 1995)

Kuvassa 10 (a) on esitetty yksinkertaisen pulssitetun kuitulaserin rakenne. Pumppuna toimivan diodilaserin tuottama säteily kytketään resonattoriin dikroisella kuitukytkimellä. Vahvistus tapahtuu maametalli-ioneilla seostetussa kuidussa. Resonaattorin muodostavat kuidun ulostulopää, joka heijastaa noin neljä prosenttia säteilystä sekä SESAM-peili. SESAM voi parametreista riippuen toimia joko passiivisena Q-kytkimenä, jolloin laser tuottaa pulsseja, joiden kesto on kymmenistä nanosekunneista satoihin nanosekunteihin, tai sitä voidaan käyttää muotolukitsemiseen, jolloin laserin tuottamien pulssien pituus voi olla sadoista femtosekunneista pikosekunteihin. Tätä ly-

hyempien femtosekuntipulssien tuottamiseen vaaditaan hienostuneempia resonattorirakenteita. (Paschotta, 2011)

Kuvassa 10 (b) on esitetty laserrakenne, joka soveltuu alle kymmenen nanosekunnin pulssien tuottamiseen suurella pulssienergialla. Pumpplaserina käytetään kapeakaista nopean vasteen DFB-diodilaseria (eng. Distributed FeedBack, hajautettu takaisinkytkentä). DFB-laserilla tuotetaan nanosekuntipulsseja vahvistuskytkemällä, eli moduloimalla pumppuvirtaa nopeasti. Nanosekuntipulssit vahvistetaan kahdessa vaiheessa: ensin pitkällä kuituvahvistimella ja pienellä vahvistuksella, sitten lyhyemmällä kuidulla ja suuremmalla vahvistuksella. Tarkoituksena on, että pulssin huipputeho nousee korkeaksi vasta vahvistusketjun loppuvaiheessa, jolloin epälineaariset ilmiöt eivät ehdi levenittää kaistaa liiallisesti. Koska takaisinkytketyn valon laservahvistus ei tapahdu optisessa kuidussa vaan DFB-laserin kaviteetissa, valonlähdettä ei tarkalleen ottaen voida kutsua kuitulaseriksi.



Kuva 10. (a) Yksinkertainen passiivisesti Q -kytketty tai muotolukittu kuitulaser (SESAM:in parametreista riippuen) (Paschotta, 2011). (b) Korkeatehoisen nanosekuntikuitulaserin rakenne. Toiminta perustuu gain-kytketyn DFB-laserin tuottamien pulssien vahvistamiseen kuituvahvistimilla.

Taulukkoon 1 on koottu yhteenvedona kaupallisesti saatavilla olevien kustannustehokkaiden Q -kytkettyjen mikrosirulaserien, nanosekuntikuitulaserien ja muotolukittujen kuitulaserin tyypilliset optiset parametrit ja hintaluokat. Taulukon on tarkoitus antaa yleiskuvaus kaupallisesti saatavilla olevien teknologioiden eroista ja hintaluokista kirjoitushetkellä, eikä se kata erikoisempien tai laboratoriossa demonstroitujen mallien ominaisuuksia. Tieto on kerätty pääosin valmistajien tuotemallistoista ja hintaluokat on arvioitu useille eri jälleenmyyjille tehtyjen hintakyselyiden perusteella.

Taulukko 1: Kaupallisesti saatavilla olevien kustannustehokkaiden Q-kytkettyjen mikrosirulaserien, nanosekuntikuitulaserien ja muotolukittujen kuitulaserin tyypilliset optiset parametrit ja hintaluokat.

	Q-kytketty mikrosirulaser	Nanosekuntikuitulaser	Muotolukittu kuitulaser
Aallonpituus	0,355 μm ; 0,532 μm ; 1,064 μm	1 μm ; 1,5 μm ; 2 μm	0,8 μm ; 1 μm ; 1,5 μm
Pulssin pituus	0,1 ns – 100 ns	0,6 ns – 100 ns	50 fs – 50 ps
Pulssienergia	0,1 μJ – 1 mJ	0,2 μJ – 1 mJ	1 nJ – 50 μJ
Jatkuva teho	10 mW – 4 W	100 mW – 2 W	10 mW – 2 W
Hintaluokka	> 4000 €	> 6000 €	> 8000 €

2.4 Epälineaariset kuidut

Epälineaarisen kuidun valinta on tyypillisesti toinen vaihe superjatkumovalonlähteen suunnittelussa. Tärkeimpiä epälineaarisen kuidun parametreja ovat läpinäkyvyys, joka määrää käytettävissä olevan aallonpituuskaistan, dispersio, eli aallonpituudesta riippuva taitekerroin, sen derivaatat ja nolladispersioaallonpituus, sekä intensiteetistä riippuva epälineaarinen taitekerroin, eli Kerr-epälineaarisuus. Muita tärkeitä parametreja ovat muodon efektiivinen poikkipinta-ala, joka määrää optisen intensiteetin suuruuden käytetylle pumpputeholle, sekä materiaalista riippuva Raman-vaste. Kuitua karakterisoiva epälineaarinen kerroin γ ottaa huomioon sekä epälineaarisen taitekertoimen, että efektiivisen poikkipinta-alan. Joissain tapauksissa myös materiaalin mekaaninen kestävyys ja optinen tehonkesto ovat tärkeitä tekijöitä. Tässä aliluvussa käsitellään lyhyesti yleisimmän superjatkumon luomiseen käytetyt piidioksidilasista (eng. silica) valmistetut yksimuoto- ja fotonikidekuidut (PCF-kuitu), sekä pehmeistä laseista valmistetut kuidut.

2.4.1 Piidioksidikuidut

Piidioksidi on yleisin optisiin kuituihin käytetty lasi, ja piidioksidikuitua valmistetaan jatkuvasti suuret määrät globaalien tietoliikenneverkon tarpeisiin. Suurin osa optisiin kuituihin liittyvästä teknologiasta on tämän vuoksi parhaiten yhteensopivia juuri piidioksidikuidun kanssa, mikä on valonlähteen suunnittelussa tärkeä käytännön näkökulma. Piidioksidilasin suosiolle on monta syytä; sillä on tunnetuista laseista pienin demonstroitu vaimennuskerroin (0,2 dB/km), se on läpinäkyvää leveällä aallonpituuskaistalla ja sen valmistamiseen käytettävää piitä on saatavilla suuret määrät maaperässä. Amorfista piidioksidia on lisäksi helppo muokata; siitä on erityisen helppoa vetää erilaisia kuituja, joista ilmatäytteinen fotonikidekuitu on kenties vaikuttavin esimerkki.

Piidioksidilasi on läpinäkyvää lähiultraviolettialueelta lähi-infrapuna-alueelle (300 nm – 2500 nm). Lyhyillä aallonpituuksilla vaimenemista dominoi Rayleigh-

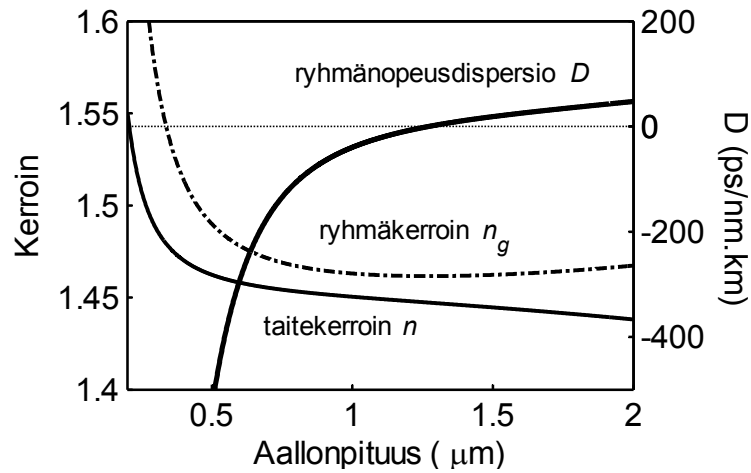
sironta, kun taas ylärajan asettaa fononiabsorptio. Ultraviolettialueella UV-fotonit voivat tummentaa lasia muodostamalla siihen värikeskuksia, mikä rajoittaa UV-superjatkumon luomiseen käytettävien pumppulaserien valikoimaa. Tyypillisesti tummumista alkaa tapahtua alle 350 nanometrin aallonpituuksilla, mutta kehittyneiden valmistusmenetelmien seurauksena markkinoille on lähivuosina tullut kuituja, joiden käyttöalue ulottuu 300 nanometriin asti. Merkittävin epäpuhtausioni piidioksidikuidun tapauksessa on hydroksidi-ioni (OH⁻). Hydroksidilla on yliharmoninen vibraatiomuoto 1380 nm aallonpituudella, mikä on lähellä sekä materiaalin nolladispersioaallonpituutta että minimivaimenemisaallonpituutta. Hydroksidi-ionit aiheuttavat 1380 nanometrin aallonpituudella 60 dB/(km·ppm):n suuruisen vaimennuksen. Modernien kaupallisesti saatavilla olevien alhaisen OH⁻-pitoisuuden kuiduille hydroksidipitoisuus on alle 1 ppm.

Piidioksidilla on muihin lasihin verrattuna suhteellisen pieni Kerr-epälineaarisuuskerroin ($n_2 = 2.4 \cdot 10^{-20}$ m/W). Matalan vaimenemiskertoimen mahdollistama pitkä vaikutusmatka sekä kentän tiukka raja-alue yksimuotokuidussa kompensoivat tätä kuitenkin tehokkaasti. Raman-vahvistuksella on leveä huippu 13,2 THz:n suuruisen taajuussiirtymän kohdalla, ja vahvistuksen huippuarvo on noin 10^{-13} m/W. Piidioksidikuidun optinen vauriokynnys on vaurioitumismekanismien tilastollisesta luonteesta johtuen vaikea määritellä tarkasti. Tyypillisesti kuidun pää on huomattavasti kuidun sisäosaa herkempi vauriolle. Suntaa-antava kirjallisuusarvo pintavauriokynnykselle on 40 J/cm^2 , kun käytetään yhden nanosekunnin pulsseja yhden mikrometrin aallonpituudella. Vauriokynnys on verrannollinen pulssin keston neliöjuureen (Stuart, 1996). Pulsin keston ollessa alle kymmenen pikosekuntia, vauriomekanismi kuitenkin muuttuu, eikä kynnys pienene enää samassa suhteessa pulssin keston pienentyessä. Jos kuidun pää on kontaminoitunut tai se on tuotu mekaaniseen kontaktiin toisen kuidun kanssa, se on huomattavasti herkempi vaurioitumiselle, minkä vuoksi kaupallisissa tuotteissa kuidut hitsataan lähes aina yhteen.

Kuvassa 11 on esitetty Sellmeierin kaavalla (Malitson, 1965) laskettu piidioksidilasin taitekerroimen aallonpituusriippuvuus (materiaalidispersio). Kuvaan on piirretty myös ryhmäkerroin $n_g = c/v_g$, missä $v_g = c(n - \lambda dn/d\lambda)^{-1}$ on ryhmänopeus ja $D = -\lambda/c d^2n/d\lambda^2$ on ryhmänopeusdispersio. Piidioksidin materiaalidisersion nolladispersioaallonpituus nähdään kuvaajassa kohtana, jossa ryhmäkerroin muuttuu aallonpituuden mukana laskevasta aallonpituuden mukana kasvavaksi, ja ryhmänopeusdispersio saa vastaavasti arvon nolla. Tämä tapahtuu piidioksidille aallonpituudella 1,3 μm ; tätä lyhyemmillä aallonpituuksilla dispersiota kutsutaan normaaliksi ja pidemmillä aallonpituuksilla se on anomaalinen.

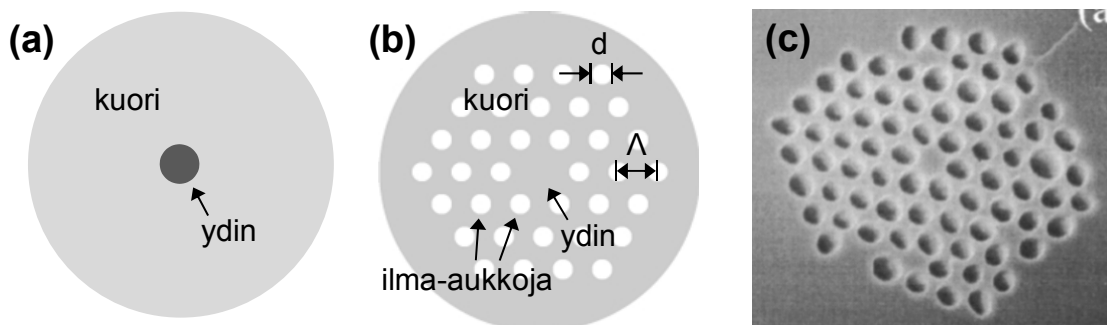
Tyypillisissä yksimuotokuiduissa taitekerroinero ytimen ja kuoren välillä on hyvin pieni (askelindeksikuiduille se on noin 0,004), minkä vuoksi aalto ei ole vahvasti ohjattu ja aaltojohteen vaikutus dispersioon on pieni. Käyttämällä vahvemmin seostettuja kuituja tai eri muotoisia ytimiä, aaltojohdedispersion vaikutusta voidaan kuitenkin kasvattaa. Tällaisia, niin kutsuttuja dispersiosirrettyjä kuituja käytetään rutiininomaisesti tietoliikennetekniikassa, ja niiden nolladispersioaallonpituus voi sijaita 1300 ja 1500 nanometrin välisellä alueella. Perinteiset yksimuotokuidut soveltuvat tämän vuoksi sel-

laisenaan superjatkumon luomiseen anomaalisen dispersio alueella ainoastaan, kun pumppulähteenä käytetään tietoliikennealueella, tai sitä pidemmällä aallonpituuksilla emittoivaa laseria. Muulloin superjatkumon luomisessa joudutaan hyödyntämään normaalin dispersio alueella esiintyviä levenemismekanismeja.



Kuva 11. Piidioksidilasin taitekerroin n , ryhmäkerroin n_g ja ryhmänopeusdispersio D aallonpituuden funktiona.

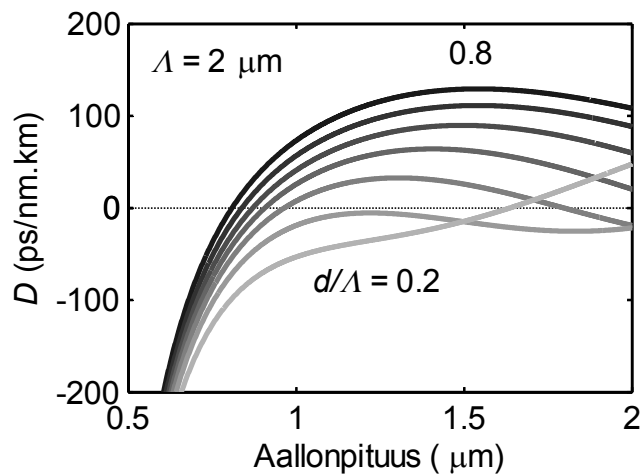
Kuvassa 12 on esitetty yksimuotokuidun (a) rinnalla fotonikidekuitu (b), jonka rakenne poikkeaa merkittävästi perinteisestä kuidusta. Taitekerroinero on fotonikidekuidussa luotu ilma-aukoilla, jotka ympäröivät puhtaasta piidioksidista koostuvan ytimen. Koska taitekerroinero ytimen ja ilman välillä on erittäin suuri (noin 0,45), kenttä on tiukasti rajattu, mistä seuraa suurempi epälineaarisuus, ja merkittävämminkin, suurempi aaltojohteen vaikutus dispersioon. Kuvassa 12 (c) on esitetty pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva kuidusta, jonka avulla J. Ranka loi vuonna 2000 ennennäkemättömän tasan ja leveäkaistaisen superjatkumon pumppaamalla titaani-safiiri-laserilla (770 nm) dispersioräätälöityä kuitua sen anomaalisella alueella (nolladispersioaallonpituus: 767 nm) (Ranka 2000). Kuvassa esitetyn rakenteen lisäksi on olemassa myös muita mikrorakenteisia kuituja, kuten nanolanka, kannateltu ydin -kuitu, sekä ilmatäytteinen fotonikidekuitu. Ilmatäytteinen kuitu on lupaava kandidaatti spektroskopiin sovelluksiin, sillä se voi itsessään toimia näytekammiona (Grgic 2010).



Kuva 12. Kaaviokuvat (a) perinteisestä yksimuotokuidusta ja (b) fotonikidekuidusta, johon on merkitty ytimen ja kuoren lisäksi suunnitteluparametrit d ja Λ . (c) Elektronimikroskooppikuva Rankan käyttämästä fotonikidekuidusta (Ranka, 2000).

Fotonikidekuidun tärkeimmät suunnitteluparametrit ovat ilma-aukkojen halkaisija d ja niiden välimatka Λ . Parametrien d ja Λ osamäärää kutsutaan ilmatäyttöparametriksi. Sen vaikutusta kuidun dispersioon on havainnollistettu kuvassa 13, johon on piirretty ryhmänopeusdispersio aallonpituuden funktiona kuvan 12 (b) kaltaiselle kolmiokuvioiselle fotonikidekuidulle, kun ilmatäyttöparametri saa arvot $d/\Lambda = 0,2 \dots 0,8$, ja ilma-aukkojen välyitys pysyy arvossa $\Lambda = 2,0 \mu\text{m}$. Kuvan ryhmänopeusdispersiokäyrät on laskettu lähteen (Saitoh, 2005) empiirisillä kaavoilla, jotka approksimoivat dispersiota hyvällä tarkkuudella kuvassa 13 käytetyllä parametrialueella. Tarkempi mallinnus voidaan suorittaa esimerkiksi vektorikenttä- tai tasoaaltomenetelmillä (Koshiba, 2002). Kuvasta nähdään, että pelkän ilmatäyttöparametrin muuttaminen mahdollistaa nolladispersioaallonpituuden räätälöinnin $0,8$ ja $1,6 \mu\text{m}$:n välillä. Ilmatäyttöparametrin lähestyessä nollaa, dispersio lähestyy kuvan 11 materiaalidisversiota, ja kun ilmatäyttöparametri lähestyy yhtä, dispersio lähestyy ilmassa kannatellun nanolangan dispersiota. Kuvasta nähdään myös fotonikidekuiduille tyypillinen toisen nolladispersioaallonpituuden olemassaolo, mikä rajoittaa aallonpituuskaistaa, jolla solitonit voivat edetä. Nolladispersioaallonpituuksien sijainnin lisäksi suunnittelussa kiinnitetään huomiota muun muassa dispersiokäyrän tasaisuuteen sekä ryhmäindeksi-profiilin muotoon. Usein tavoitteena on U-kirjaimen muotoinen ryhmäindeksi-profiili, joka mahdollistaa solitonien ja dispersiivisten aaltojen jatkuvan vuorovaikutuksen ristivaihemodulaatiovangitsemisen kautta.

Räätälöidyn dispersioprofiilin ja suuremman epälineaarisuuden lisäksi fotonikuidulla on muihin kuituihin nähden myös kolmas hyödyllinen ominaisuus: kun $d/\Lambda < 0,4$, kuitu toimii yksimuotoisena kaikilla aallonpituuksilla (Birks, 1997). Yksimuotoisen superjatkumon luomisen kannalta tällä on kolme merkitystä. Ensinnäkin se mahdollistaa kuidun ytimen halkaisijan kasvattamisen, jolloin voidaan käyttää suurempia pumpputehoja; toiseksi se mahdollistaa pumppaamisen lyhyemmillä aallonpituuksilla ilman, että täytyisi käyttää kuitua, jonka ydin on epäkäytännöllisen pieni. Kolmanneksi pitkilläkin pumppuaallonpituuksilla luodun superjatkumon sinisiirtyneimmän reunan yksimuotoisuudesta ei tarvitse erikseen huolehtia.



Kuva 13. Ryhmänopeusdispersio fotonikidekuidulle eri ilmatäyttövakioiden arvoilla, $d/\Lambda = 0,2 \dots 0,8$, ilma-aukkojen välytyksen pysyessä arvossa $\Lambda = 2 \mu\text{m}$.

2.4.2 Pehmeälasikuidut

Piidioksidikuitu on materiaaliominaisuuksiensa ja muokattavuutensa vuoksi hyvä valinta kuitumateriaaliksi, kun superjatkumo halutaan luoda ultraviolett-, näkyvälle tai lähi-infrapuna-alueelle. On kuitenkin paljon sovelluksia, jotka hyötyisivät keski-infrapuna-alueella toimivasta superjatkumovalonlähteestä. Joissain tapauksissa perinteisiä laajakaistaisia lähteitä kertaluokkia kirkkaampi infrapunavalonlähde voisi mahdollistaa jopa täysin uusien optisten sovellusten kehittämisen. Koska piidioksidin vaimenemiskerroin kasvaa jyrkästi yli kahden mikrometrin aallonpituuksilla, keski-infrapunasuperjatkumon luomiseen on käytettävä muita laseja.

Taulukkoon 2 on koottu yleisimpien keski-infrapuna-alueella läpinäkyvien pehmeiden lasien lyhenteet, pääkomponentit, lineaariset ja epälineaariset taitekertoimet, nolladispersioaallonpituudet (ZDW) sekä monifononiabsorptioreunan teoreettiset paikat. Kauemmas infrapuna-alueelle ulottuva läpinäkyvyysikkuna johtuu pääasiassa materiaalille ominaisen monifononiabsorption tapahtumisesta pidemmällä aallonpituuksilla. Fononiabsorptioreunan siirtyminen saadaan aikaan koostamalla lasihila raskaammista ja/tai heikommin sidotuista atomeista, jolloin hilavärähtelyt tapahtuvat matalammilla taajuuksilla. Pehmeillä laseilla on piidioksidia selvästi suurempi lineaarinen taitekerroin sekä tyypillisesti 10 – 100 kertaa suurempi epälineaarinen taitekerroin. Epälineaarista taitekerrointa voidaan kasvattaa korvaamalla happiatomeja raskasmetalleilla tai happiryhmän alkuaineilla, jolloin lasihilan polarisoituvuus kasvaa. Kaikkien pehmeiden lasien nolladispersioaallonpituus sijaitsee myös piidioksidia pidemmällä aallonpituudella. (Price, 2007)

Taulukko 2. Piidioksidin ja pehmeiden lasien optiset ominaisuudet (Price, 2007)

Lasityyppi	Lyhenne	Pääkomponentit	n_0	$n_2 \times 10^{20}$ (m ² /W)	ZDW (μm)	Fononiabsorptioreuna (μm)
Piidioksidi	Si	SiO ₂	1.45	2.7	1.26	3.5
Lyijysilikaatti	SF57	PbO-SiO ₂	1.81	41	2.00	2.5
Vismuttioksidi	Bi	Bi ₂ O ₃	2.02	32	2.29	3.8
Germanaatti	PbGe	PbO-GeO ₂	1.80	22	1.78	4.5
Telluriitti	ZnTe	ZnO-TeO ₂	2.03	51	2.24	4.7
Fluoridi	ZBLAN	ZrF ₄ -BaF ₂	1.50	3.3	1.62	5.0
Kalkogenidi	AsS	As ₂ S ₃	2.44	594	4.81	8.8
"	GLS	Ga ₂ S ₃ -La ₂ S ₃	2.41	216		6.0
"	GLSO	Ga ₂ S ₃ -La ₂ O ₃	2.25	177	4.64	

Pehmeistä laseista tehtyjen kuitujen erikoisluonteen vuoksi niiden hinta on korkea, eikä niiden valmistustekniikka ei ole yhtä pitkälle kehittyntä kuin piidioksidin tapauksessa. Tästä on seurauksena piidioksidikuitua suuremmat epäpuhtauspitoisuudet ja geometriset epätäydellisyydet, erityisesti mikrorakenteisissa kuiduissa. Lisäksi monet

pehmeistä laseista ovat nimensä mukaisesti hauraita, hydrofiilisiä, tai muilla tavoin kemiallisesti epästabiileja. Pidemmällä sijaitseva nolladispersioaallonpituus rajoittaa osaltaan superjatkumon luomiseen soveltuvien pumppulaserien valikoimaa, mitä voidaan kuitenkin kompensoida aaltojohdedispersiota räätälöimällä. Muita heikkouksia voidaan osittain kompensoida piidioksidia suuremmalla epälinearisuudella, sillä se mahdollistaa superjatkumon luomisen pienillä pumpputehoilla tai vaihtoehtoisesti erittäin lyhyessä kuidussa.

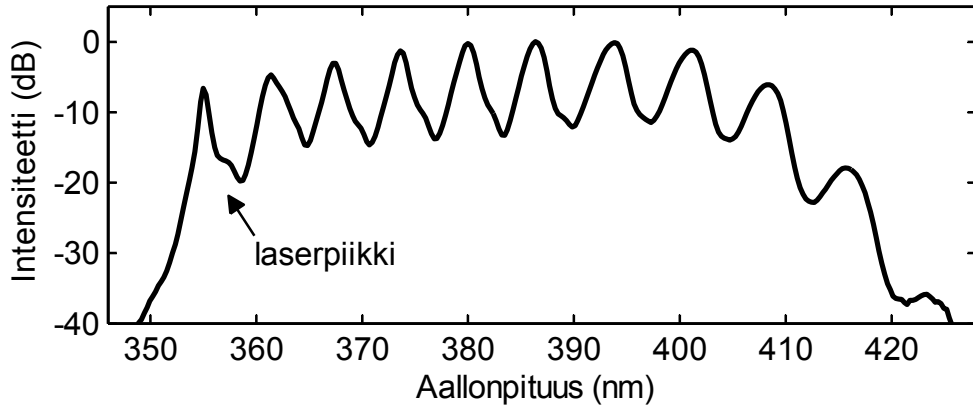
Yksi lupaavimmista kandidaateista keski-infrapuna-alueen superjatkumon luomiseen on telluriitti, joka on fyysisesti kestävä, ja jolla on demonstroitu superjatkumon luominen 4,9 mikrometrin aallonpituuteen asti pumppaamalla femtosekuntipulsseilla alle senttimetrin pituista kuitua (Domachuk, 2008). Toinen lupaava kandidaatti on piidioksidin kaltainen ZBLAN-fluoridikuitu, jolla on luotu useiden wattien keskimääräisen tehon superjatkumo 4,5 mikrometriin asti käyttäen nanosekuntipulsseja (Xia, 2007), ja 6,3 mikrometriin femtosekuntipulsseilla (Qin, 2009). Lähteen (Xia, 2007) spektri ja yksi sen sovelluskohteista on esitetty seuraavassa aliluvussa. Kolmantena vaihtoehtona voidaan mainita kalkogenidi, jonka suuri epälinearisuus mahdollistaa superjatkumon luomisen erittäin pienillä pumpputehoilla (Yeom, 2008).

2.5 Aallonpituusalueet ja sovellukset

Tässä aliluvussa esitellään kolme kokeellisesti demonstroitua valonlähdettä, jotka kattavat UV-alueen, näkyvän ja lähi-infrapuna-alueen sekä keski-infrapuna-alueen. Lisäksi käydään läpi muutamia sovellusesimerkkejä esitellyille tai niiden kaltaisille superjatkumovalonlähteille. Esitellyt valonlähteet toimivat hyvinä, mutta eivät kattavina esimerkeinä superjatkumoteknologian mahdollisuuksista eri aallonpituusalueilla. Sama pätee sovelluksiin; kaupallisia superjatkumovalonlähteitä on ollut vasta lyhyen aikaa saatavilla, mistä johtuen niiden käyttöä ei ole demonstroitu kuin pienessä osassa potentiaalisista sovelluksista.

2.5.1 Ultravioletialue

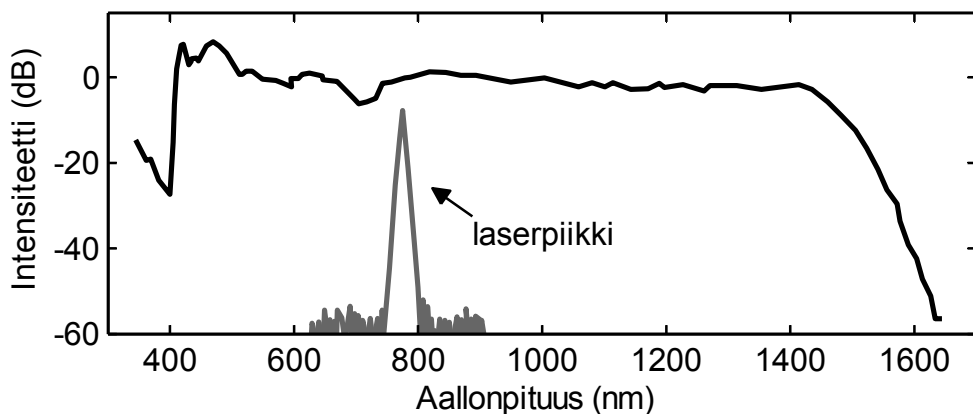
Kuvassa 14 on esitetty ultraviolettiperjatkumo, joka on aikaansaatu pumppaamalla UV-alueelle suunniteltua piidioksidi-yksimuotokuitua normaalin dispersion alueella taajuustriplatin Nd:YAG-laserin tuottamilla nanosekuntipulsseilla (Lin, 1976; Bartula, 2006; Aalto, 2010). Spektrisen levenemisen pääasiallinen aiheuttaja näissä olosuhteissa on moninkertainen stimuloitu Raman-sironta. Menetelmän etuna on yksinkertaisuus, kustannustehokkuus ja hyvä konversiohyötysuhde pumpusta pidemmille aallonpituuksille. Syvemmällä UV-alueella pumppaaminen on mahdollista, mutta sitä ei ole vielä demonstroitu kokeellisesti. Vastaavan kaltaista superjatkumovalonlähdettä on käytetty muun muassa STED-mikroskopiassa (Rankin, 2008) ja polttomootoritutkimuksessa (Bartula, 2009). Sillä on lisäksi paljon potentiaalisia sovelluksia ilmakehätutkimuksessa (Strong, 1995) sekä raskasmetallien spektroskopiassa.



Kuva 14. Moninkertaisen stimuloidun Raman-sironnan avulla nanosekuntipulsseilla luotu UV-superjatkumo (Aalto, 2010).

2.5.2 Näkyvä ja lähi-infrapuna-alue

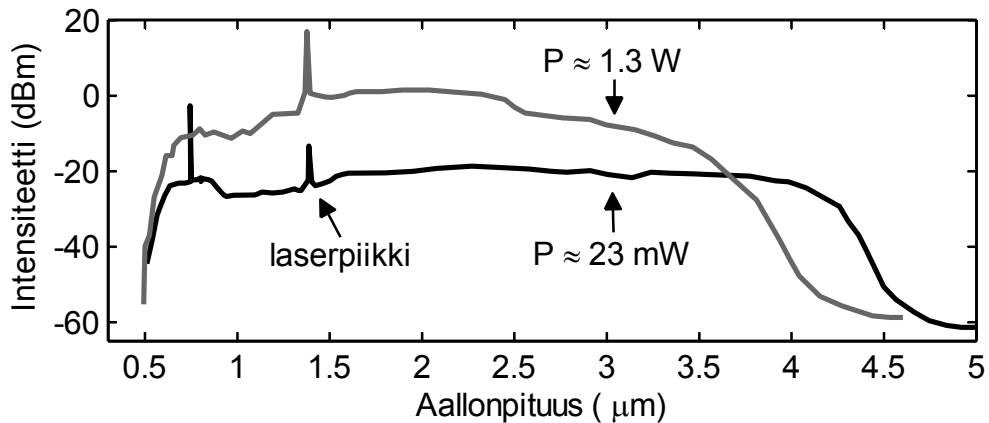
Kuvassa 15 on esitetty tieteenalan kehityksen eräänlaisena kulminaatiopisteenäkin pidetty, J. Rankan vuonna 2000 demonstroima, koko näkyvän ja lähi-infrapuna-alueen kattava superjatkumo, joka on aikaansaatu pumpaamalla dispersiomuokattua fotonikidekuitua anomaalisen dispersion alueella titaani-safiiri-laserin tuottamilla femtosekuntipulsseilla. Muodostumisdynamiikkaa dominoi solitonifissio ja solitonin itseistaajuussiirto. Valonlähde olisi mahdollista toteuttaa myös kustannustehokkaammalla muotolukitulla kuitulaserilla, ja pitkien pumpupulssien mekanismeja hyödyntäen lähes vastaava kaista voitaisiin saavuttaa myös mikrosirulaserilla (Stone, 2008). Erittäin leveän ja tasanaisen spektrin vuoksi valonlähdettä voidaan käyttää joustavasti eri sovelluksissa, ja monet kaupallisesti saatavilla olevat superjatkumot perustuvatkin juuri tähän menetelmään. Toisaalta leveä spektri tarkoittaa suurta määrää hukattua valotehoa sovelluksissa, jotka eivät hyödynnä kuin osan superjatkumon kaistasta. Sovellusesimerkkeinä voidaan mainita muun muassa aikaerotteinen sekä kaviteettitehosteinen spektroskopia (Kaminski, 2008), biolääketieteellinen mikroskopia (Kaminski, 2008) ja optinen koherenssitomografia (Moon, 2006; Aguirre, 2006).



Kuva 15. Fotonikidekuidussa femtosekuntipulsseilla luotu näkyvän ja lähi-infrapuna-alueen kattava superjatkumo (Ranka, 2000).

2.5.3 Keski-infrapuna-alue

Kuvassa 16 on esitetty kaksi dispersiosiiirretyssä piidioksidi- ja ZBLAN-fluoridikuidussa luotua keski-infrapunasuperjatkumoa, jotka on generoitu pumppaamalla yhdistelmäkuitua kuvan 10 (b) kaltaisella, nanosekuntipulsseja tuottavalla kuituvahvistetulla diodilaserilla, joka toimii $1,5 \mu\text{m}$:n aallonpituudella (Xia, 2007). Piidioksidikuitua käytetään solitonien synnyttämiseen, sekä niiden punasiirtämiseen siten, että ne astuvat fluoridikuituun sen anomaalisen dispersion alueella. Tulokset demonstroivat pienellä pumpputeholla pumppaamisen potentiaalia pehmeälasikuiduissa ja toisaalta hyvää skaalautuvuutta erittäin suurille pumpputehoille. Kirjoittajat ovat myöhemmin skaalanneet superjatkumon yli 10 W tehoon asti ja soveltaneet lähdettä lipidien ja proteiinien absorptiospektroskopiaan ja differentiaalivaurioanalyysiin (Ke, 2009). Keski-infrapuna-alue on erityisesti kaasufaasin molekyyli-spektroskopian kannalta mielenkiintoinen, sillä alueella sijaitsee lähes kaikkien yleisimpien hivenkaasujen fundamentaalisia tai vahvoja yliharmonisia vibraatio-rotaatio-transitioita. Keski-infrapuna-superjatkumolla on myös paljon potentiaalia erilaisiin pitkän matkan differentiaaliabsorptio- ja LIDAR-sovelluksiin (Brown, 2008).



Kuva 16. ZBLAN-fluoridikuidussa nanosekuntipulsseilla luotu keski-IR-superjatkumo (Xia, 2007).