

DIPLOMITYÖ

JOUKO TURUNEN 2004

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan osasto

DIPLOMITYÖ

Optisen 1.6GHz signaalin monistin

Diplomityön aihe on hyväksytty sähkötekniikan osastoneuvoston kokouksessa 10.03.2004.

Diplomityön tarkastajina ovat toimineet professorit Tuure Tuuva ja Pertti Silventoinen. Ohjaajana on toiminut diplomi-insinööri Matti Iskanius.

Lappeenrannassa 20.04.2004

Jouko Turunen

Linnunrata 10 G 10

53850 Lappeenranta

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Sähkötekniikan osasto

Jouko Turunen

Optisen 1.6 GHz signaalin monistin

Diplomityö
2004

59 sivua, 28 kuvaa , 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastajat: professori Tuure Tuuva
 professori Pertti Silventoinen

Hakusanat: CERN, CMS, Signaalinmonistin

Tässä diplomityössä suunnitellaan CERN:in (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) Compact Muon Solenoid –nimiseen hiukkasilmäinjärjestelmään laite, joka monistaa 1.6 Gbit/s nopeudella saapuvia optisia signaaleja useaan eri kohteeseen.

Aluksi suunnitellaan ja rakennetaan testauslaite, jonka avulla tutkitaan eri komponenttien soveltuvuutta laitteistoon. Lisäksi testauslaitteella haetaan laserohjaimille ja vastaanottimille sopivia säätöarvoja. Testauslaitteesta saatujen kokemusten perusteella suunnitellaan ja rakennetaan signaalinmonistinlaitteisto, johon tuodaan useita satoja erillisiä signaaleja. Jokainen näistä signaaleista monistetaan joko kahdeksi tai neljäksi lähteväksi signaaliksi. Lopuksi testauslaitteella tutkitaan signaalinmonistinlaitteiston toimintaa ja luotettavuutta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Department of electrical engineering

Jouko Turunen

Design of a 1.6 GHz optical splitter

Master's thesis

2004

59 pages, 28 figures, 1 table and 2 appendices

Supervisors: professor Tuure Tuuva
professor Pertti Silventoinen

Keywords: CERN, CMS, Optical splitter

The aim of this work is to design a device that receives several optical signals at the speed of 1.6 Gbit/s and then forwards these same signals to two or four targets.

First, a tester is designed and built to examine which components could be used in the optical splitter. The tester is also used to seek optimum parameters, e.g. laser bias current, for the system. Based on the experience from the tester, an optical splitter system is designed and built to be used in CERN's (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) particle detector called Compact Muon Solenoid.

After been built, the splitter system is thoroughly analyzed using the tester designed earlier.

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolle. Työ liittyy CERN:in (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) Compact Muon Solenoid -hiukkastutkimushankkeeseen, johon Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolla suunnitellaan professori Tuure Tuuvan johdolla optinen signaalinmonistinlaitteisto.

Työn ohjaajana on toiminut diplomi-insinööri Matti Iskanius Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun elektroniikan suunnittelukeskuksesta. Työn tarkastajina ovat toimineet professorit Tuure Tuuva ja Pertti Silventoinen.

Esitän tässä kiitokset professori Tuure Tuuvalle mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisesta aiheesta. Lisäksi kiitän Matti Iskaniusta ja Juha Juutia sekä koko sähkötekniikan osaston henkilökuntaa hyvistä vinkeistä ja neuvoista.

Suuri kiitos kuuluu myös perheelleni tuesta opintojani ja diplomityötäni kohtaan. Kiitän myös opiskelukavereitani Erkko Helmistä ja Markku Kinnusta mukavasta seurasta koko opiskeluajalta.

Lappeenrannassa 20.04.2004

Jouko Turunen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	10
2	TEORIAA	13
	2.1 Optisista kuiduista	13
	2.1.1 Optiset kuidut ja kokonaisheijastus	13
	2.1.2 Kuitutyypit	16
	2.1.3 Vaimennus optisessa kuidussa	18
	2.1.4 Dispersio	20
	2.1.5 Optisen kuidun tiedonsiirtokapasiteetti	22
	2.2 Optisista lähettimistä	22
	2.2.1 Valodiodit	22
	2.2.2 Laserdiodit	25
	2.3 Valoilmaisimista	29
	2.3.1 Pn-fotodiodit	29
	2.3.2 Pin-fotodiodit	32
	2.3.3 Vyöryfotodiodit	32
	2.4 Digitaalisen signaalin moduloinnista ja demoduloinnista	33
	2.4.1 Modulointi	33
	2.4.2 Demodulointi	34
	2.5 Siirtojohdoista	36
3	LAITTEISTON SUUNNITTELU	38
	3.1 Johdanto	38
	3.2 Testauslaite	38
	3.2.1 Testauslaitteen toiminta ja rakenne	39
	3.2.2 Testauslaitteen layout	42
	3.3 Signaalinmonistin	44
	3.3.1 Signaalinmonistimen toiminta ja rakenne	44
	3.3.2 Signaalinmonistimen layout	46

4	MITTAUKSET	49
	4.1 Testauslaitteen mittaustulokset	49
	4.2 Signaalinmonistimen mittaustulokset	54
5	YHTEENVETO	57
6	KIRJALLISUUSVIITTEET	58

LIITTEET:	I	Testauslaitteen piirikaavio
	II	Signaalinmonistimen piirikaavio

Symbolit

α	kulma	[°]
b	paksuus	[mm]
BPS	tiedonsiirtonopeus	[bit/s]
c	valon nopeus tyhjiössä ($3 \cdot 10^8$)	[m/s]
d	halkaisija	[μ m]
E	energia	[eV]
h	Planckin vakio ($6.6261 \cdot 10^{-34}$)	[Js]
h	korkeus	[mm]
i	virta	[A]
k	virheiden lukumäärä	[-]
λ	aallonpituus	[nm]
M	aaltomuotojen lukumäärä	[-]
n	taitekerroin	[-]
ν	taajuus	[1/s]
P	todennäköisyys	[-]
R	resistanssi	[Ω]
t	aika	[s]
tc	lämpötilakerroin	[ppm/°C]
θ	kulma	[°]
V	V-parametri	[-]
w	leveys	[mm]
Z	impedanssi	[Ω]

Alaindeksit

BIAS	biasointi
c	kriittinen
err	virhe
g	rako
MAX	maksimi
MOD	modulointi
TC	lämpötilakompensointi

Lyhenteet

BER	Bit Error Rate, virhekerroin
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CMS	Compact Muon Solenoid
LHC	Large Hadron Collider
NA	Numeerinen aukko
NRZ	Non-return-to-zero
RZ	Return-to-zero

1 JOHDANTO

Mistä maailma koostuu? Miten se toimii? Vaikeita kysymyksiä, joihin ihminen on koettanut löytää vastausta jo tuhansia vuosia. Noin 2000 vuotta sitten kreikassa syntyivät ensimmäiset ajatukset siitä, että kaikki maailman materia koostuu muutamasta perusosasta ja niiden välisistä vuorovaikutuksista. Perusosasten – tai alkeishiukkasten, tutkimiseen tarvittava tekniikka saatiin kehitettyä kuitenkin vasta 1900-luvulla.

Hiukkasfysiikka etsii ja tutkii aineen perusosasia ja niihin vaikuttavia voimia. Suurimpia kysymyksiä hiukkasfysikoiden keskuudessa tällä hetkellä on, mikä aiheuttaa niin sanotun sähköheikon vuorovaikutuksen symmetriarikon ja määrää alkeishiukkasten massan.

Eräs mahdollinen symmetriarikon aiheuttaja on niin sanottu Higgsin mekanismi. Higgsin teoria selittää alkeishiukkasten massat siten, että koko tyhjiön täyttää voimakenttä jota kutsutaan Higgsin kentäksi. Tällöin tyhjiössä kulkevat alkeishiukkaset saavat massan vuorovaikuttaessaan Higgsin kentän kanssa. Higgsin mekanismin pitäisi ilmentyä niin sanottuina Higgsin bosoneina. Näitä ei kuitenkaan vielä ole pystytty löytämään.

Toinen mahdollinen vaihtoehto on, että tähän saakka alkeishiukkasina pidetyillä kvarkeilla ja leptoneilla onkin sisäistä rakennetta. Siinä tapauksessa niiden massat määräytyisivät samalla tavalla kuin atomiydinten massat. Tätäkään teoriaa ei ole vielä onnistuttu todistamaan oikeaksi eikä vääräksi. /1/

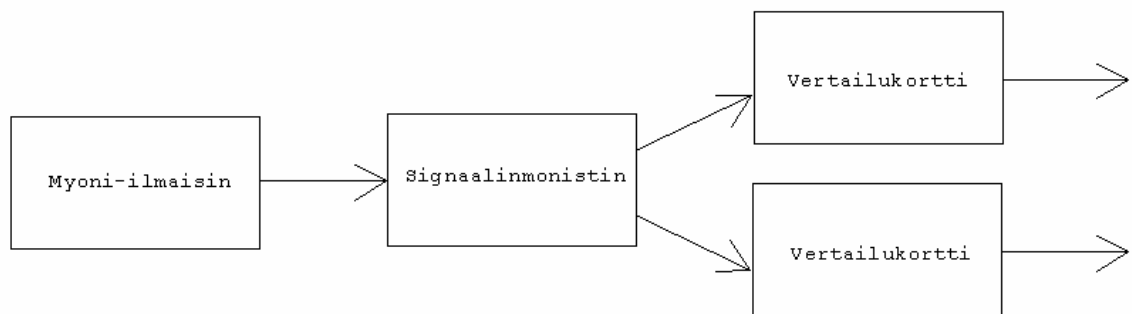
Lisää tietoa aiheesta toivotaan löydettävän suurilla hiukkaskiihdyttimillä. CERN, Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, rakentaa parhaillaan Sveitsiin Geneven lähelle maailman suurinta hiukkaskiihdytintä nimeltä Large Hadron Collider, LHC. Se muodostuu kahdesta suprajohtavia magneetteja käyttävästä synkrotronirenkaasta. Kummassakin LHC:n synkrotronissa annetaan protoneille 7 TeV energia, jonka jälkeen näitä suurienergisiä protoneja törmäytetään toisiinsa.

Protonikimput kohtaavat toisensa hiukkaskiihdyttimessä 40 miljoonaa kertaa sekunnissa ja keskimäärin tapahtuu 20 törmäystä kerralla. Näin törmäyksiä tapahtuu 800 miljoonaa kappaletta sekunnissa. Ylivoimaisesti suurin osa törmäyksistä on kuitenkin vain osittaisia, kohtisuorat törmäykset ovat hyvin harvinaisia. Näissä harvinaisissa törmäyksissä syntyy kuitenkin uusia hiukkasia kuten elektroneja, fotoneja, hadroneja ja myoneja. Syntyvien hiukkasten energiaa, liikerataa ja liikemäärävektoria tutkitaan useilla päällekkäisillä ilmaisimilla.

Tulevan hiukkaskiihdyttimen yksi pääosista on mittausasema, jota kutsutaan nimellä Compact Muon Solenoid, CMS. Se koostuu lukuisista päällekkäisistä antureista, jotka on sijoitettu sylinterimäisen aseman sivuille. Myoni-ilmaisimina toimivat resistiiviset, freonilla ja muilla kaasuilla täytetyt levymäiset kammiot, RPC:t (engl. resistive plate chamber). Nämä kammiot on jaettu kahteentoista osaan, jokainen osa kattaa sylinterin vaipasta 30 asteen sektorin. Koska yksittäinen myoni voi kulkea useamman tällaisen sektorin kautta, on jokainen kammio kytkettävä useampaan analysointikorttiin. Tämä onnistuu monistamalla kultakin anturilta tuleva informaatio useampaan kohteeseen.

Koska kokeissa syntyvä datamäärä on valtavan suuri, vain pieni osa syntyneestä informaatiosta pystytään tallentamaan lopullista analysointia varten. Vain tietyt kriteerit täyttävät signaalit tallennetaan, päätös tallennuksesta tehdään erityisillä vertailukorteilla.

/2/



Kuva 1. Yksinkertaistettu kaavio ilmaisinalteistosta. Myoni-ilmaisimilta saapuva informaatio monistetaan usealle vertailukortille, joissa päätetään, tallennetaanko signaali analysointia varten. Suurin osa aineistosta hylätään, oleellinen informaatio lähetetään vertailukorteilta analysoitavaksi.

Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa toimivan, professori Tuure Tuuvan johtaman työryhmän tehtävänä on kehittää CMS-järjestelmään laite, joka vastaanottaa yhdeltä ilmaisimelta optista kuitua pitkin 1.6 gigabitin sekuntinopeudella saapuvan informaation ja lähettää tämän saman informaation alkuperäisessä muodossaan edelleen joko kahdelle tai neljälle vertailukortille optista kuitua pitkin. Näitä signaalinmonistimia järjestelmään tarvitaan satoja kappaleita.

Tässä diplomityössä suunnitellaan aluksi laitteiston kehitystyökaluksi testauslaite, jonka avulla suunnitellaan sitten varsinainen signaalinmonistinlaitteisto. Lopuksi testauslaitetta käytetään suunnitellun signaalinmonistimen toiminnan ja luotettavuuden tutkimiseen.

Signaalinmonistinlaitteisto koostuu useasta yhdestä kahteen ja yhdestä neljään – tyyppisestä moduulista, jotka kootaan 366 mm x 400 mm kokoisille piirikorteille. Tavoitteena on suunnitella mahdollisimman pienellä komponenttimäärällä vähän virtaa kuluttava laite, joka ei aiheuta signaaliin bittivirheitä.

2 TEORIAA

2.1 Optisista kuiduista

Nopeat tiedonsiirtolinjat toteutetaan nykyään lähes yksinomaan optisia kuituja käyttämällä. Optisten kuitujen etuja ovat suuri kaistanleveys, pienet häviöt, sähkömagneettisten häiriöiden sieto, keveys ja kestävyys. Optiset kuidut eivät käytössä juurikaan lämpene kuparikaapelien tapaan, sillä liikkuvat fotonit eivät elektronien tapaan ole voimakkaassa vuorovaikutuksessa toistensa kanssa. Näin ollen kuiduissa syntyy paljon vähemmän kohinaa kuin kuparikaapeleissa.

2.1.1 Optiset kuidut ja kokonaisheijastus

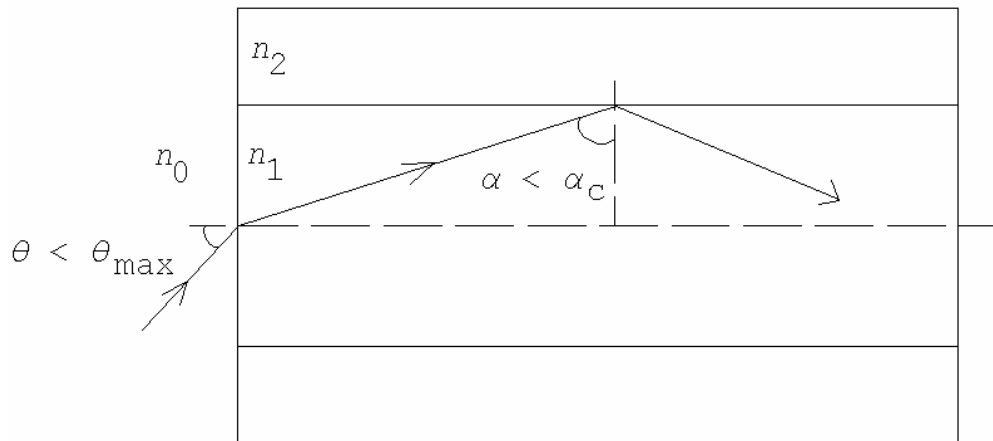
Tiedonsiirto optisessa kuidussa perustuu kokonaisheijastukseen.

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Kaavassa (1) on esitetty Snellin laki, joka esittää valon tulo- ja heijastuskulmien α_1 , α_2 ja aineiden taitekertoimien n_1 , n_2 välisen yhteyden. Kuidun ytimen taitekertoimen n_1 tulee olla suurempi kuin kuoren taitekerroin n_2 jotta heijastus tapahtuu. Suurinta kulmaa, jolla tuleva valo vielä heijastuu aineiden rajapinnasta kutsutaan kokonaisheijastuksen rajakulmaksi tai kriittiseksi kulmaksi α_c . Se saadaan asettamalla Snellin lakiin heijastuskulmaksi α_2 90 astetta, jolloin termi $\sin \alpha_2$ supistuu pois.

$$\sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Mikäli valo saapuu aineiden n_1 ja n_2 rajapintaan tätä kulmaa suuremmassa kulmassa, ei se enää heijastu kuidun reunasta, vaan tunkeutuu kuoreen.



Kuva 2. Valon eteneminen optisessa kuidussa. θ_{MAX} on suurin tulokulma, jolla valo vielä heijastuu kuoresta takaisin ytimeen. Kuoren taitekerroin n_2 on pienempi kuin ytimen taitekerroin n_1 . n_0 on esimerkiksi ilman taitekerroin. /4/

Sovelletaan Snellin lakia kuvan (2) tilanteeseen.

$$\frac{\sin \theta_{\text{MAX}}}{\sin(90^\circ - \alpha_c)} = \frac{n_1}{n_0} \quad (3)$$

Eliminoimalla α_c saadaan θ_{MAX} , valon suurin tulokulma, jolla heijastus kuidun ytimen ja kuoren rajapinnalla vielä tapahtuu.

$$\sin \theta_{\text{MAX}} = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} \quad (4)$$

Kaavan (4) neliöjuuritermiä kutsutaan numeeriseksi aukoksi, NA :ksi. Se on optisten kuitujen yhteydessä käytetty parametri, joka kaavan (4) mukaisesti vaikuttaa siihen, kuinka suuressa kulmassa valo voidaan kuituun tuoda kokonaisheijastuksen vielä tapahtuessa.

Määritellään vielä niin sanottu V -parametri.

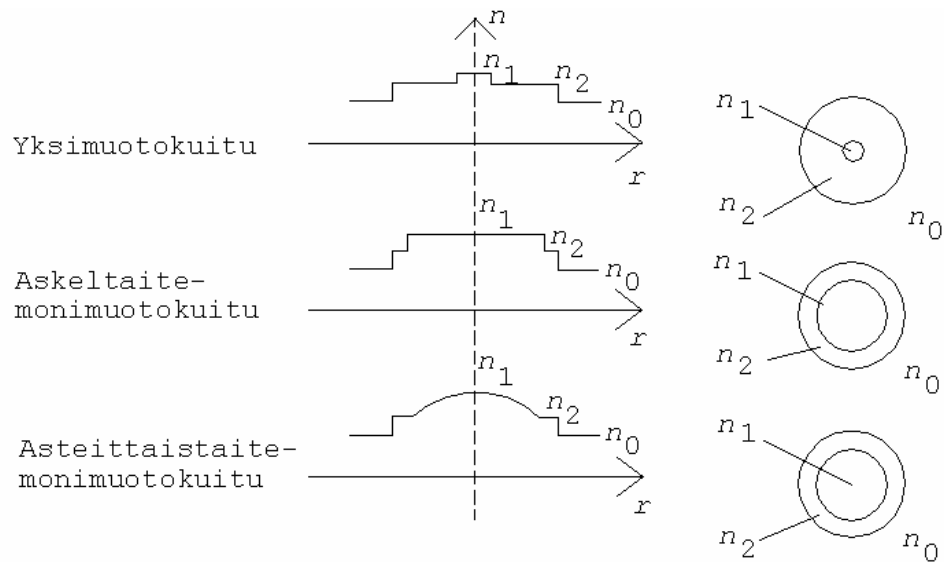
$$V = \frac{\pi d}{\lambda} \cdot NA, \quad (5)$$

jossa d on kuidun ytimen halkaisija, λ aallonpituus tyhjiössä ja NA edellä määritelty numeerinen aukko. Jos V -parametri on pienempi kuin 2.405, kuidussa kulkee vain yksi aaltomuoto. Jos V -parametri on suurempi kuin 2.405, voidaan aaltomuotojen lukumäärä M laskea likiarvokaavalla (6). /4/

$$M \approx \frac{V^2}{2} \quad (6)$$

2.1.2 Kuitutyypit

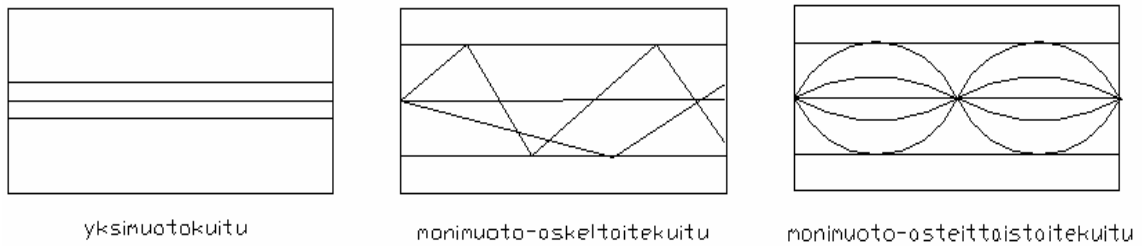
Tiedonsiirtoon käytetyt optiset kuidut jaetaan yleensä kahteen luokkaan; yksi- ja monimuotokuidut. Monimuotokuidut voidaan jakaa vielä kahteen luokkaan, askel- ja asteittaistaitekuituihin.



Kuva 3. Eri kuitutyypin rakenne ylhäältä alaspäin. Yksimuotokuitu, askeltaitekuitu ja asteittaistaitekuitu. n_1 on ytimen taitekerroin, n_2 on kuoren taitekerroin ja n_0 on esimerkiksi ilman tai johtimen pintamateriaalin taitekerroin. Yksimuotokuidussa ja askeltaitekuiduissa taitekerroin muuttuu askelmaisesti, asteittais-taitekuidun taitekerroin muuttuu vähitellen keskikohtaa lähestyttäessä. /3/

Yksimuotokuidussa etenee nimensä mukaisesti vain yksi aaltomuoto. Tämä johtuu siitä, että yksimuotokuidun ytimen halkaisija on hyvin pieni, tyypillisesti vain $9 \mu\text{m}$ kuoren halkaisijan ollessa $125 \mu\text{m}$. Yksimuotokuitujen etuna ovat pienemmät häviöt mutta toisaalta valon kytkeminen niihin on pienen halkaisijan vuoksi hankalampaa kuin monimuotokuiduissa.

Monimuotokuiduissa etenee ytimen halkaisijan suuruuden vuoksi useita aaltomuotoja. Tämä aiheuttaa kyseisille kuitutyypeille hieman suuremmat häviöt yksimuotokuituihin verrattuna. Toisaalta monimuotokuituihin on niiden ytimen suhteellisen suuren halkaisijan ansiosta varsin helppo kytkeytyä. Monimuotokuitujen ydinten tyypilliset halkaisijat ovat $50 \mu\text{m}$ ja $62.5 \mu\text{m}$ kuoren halkaisijan ollessa $125 \mu\text{m}$.



Kuva 4. Valon eteneminen yksi- ja monimuotokuiduissa. Yksimuotokuidussa etenee vain yksi aaltomuoto, monimuotokuiduissa useita. Asteittaistaite-monimuotokuidussa valo kulkee nopeammin ytimen reunoilla kuin keskellä, sillä ytimen taitekerroin pienenee tasaisesti etäännyttäessä kuidun symmetria-akselista. Tästä syystä pidemmän matkan kulkeva aaltomuoto ei viivästy suoraan etenevästä aaltomuodosta niin paljoa kuin askeltaite-monimuotokuidussa, jossa taitekerroin muuttuu askelmaisesti ytimen ja kuoren rajapinnalla. /3/

Optisten kuitujen valmistusmateriaalina on useimmiten piidioksidi, SiO_2 . Kuidun ytimeen seostetaan lisäksi pieniä määriä esimerkiksi germaniumia (Ge), jotta taitekerroin saadaan hieman kuoren taitekerrointa suuremmaksi.

Joissakin tapauksissa voidaan käyttää myös muovipohjaisia kuituja, jotka ovat hyvin edullisia. Muovipohjaisten kuitujen ytimen tyypillinen halkaisija voi olla esimerkiksi $980 \mu\text{m}$ ja kuoren halkaisija $1000 \mu\text{m}$. Niiden valmistaminen ja käyttäminen on suuren koon vuoksi helppoa ja edullista. Toisaalta näin paksussa kuidussa kulkevien aaltomuotojen määrä on suuri, mikä johtaa suurempiin häviöihin. Siksi muovipohjaisia kuituja käytetään vain varsin pienillä siirtonopeuksilla ja lyhyillä etäisyyksillä. /4/ ja /5/

2.1.3 Vaimennus optisessa kuidussa

Optisissa kuiduissa syntyy vaimennusta kolmen eri mekanismin vaikutuksesta.

Absorptio:

Edetessään väliaineessa sähkömagneettinen aalto saa väliaineen ionit värähtelemään, jolloin osa valotehosta muuttuu lämmöksi ja signaali vaimenee. Suurimman osan absorptiosta optisissa kuiduissa aiheuttavat etenevän sähkömagneettisen aallon piidioksidein synnyttämät molekyylivärähtelyt ja kuidussa olevat veden hydroksyyli- eli OH⁻-ionit.

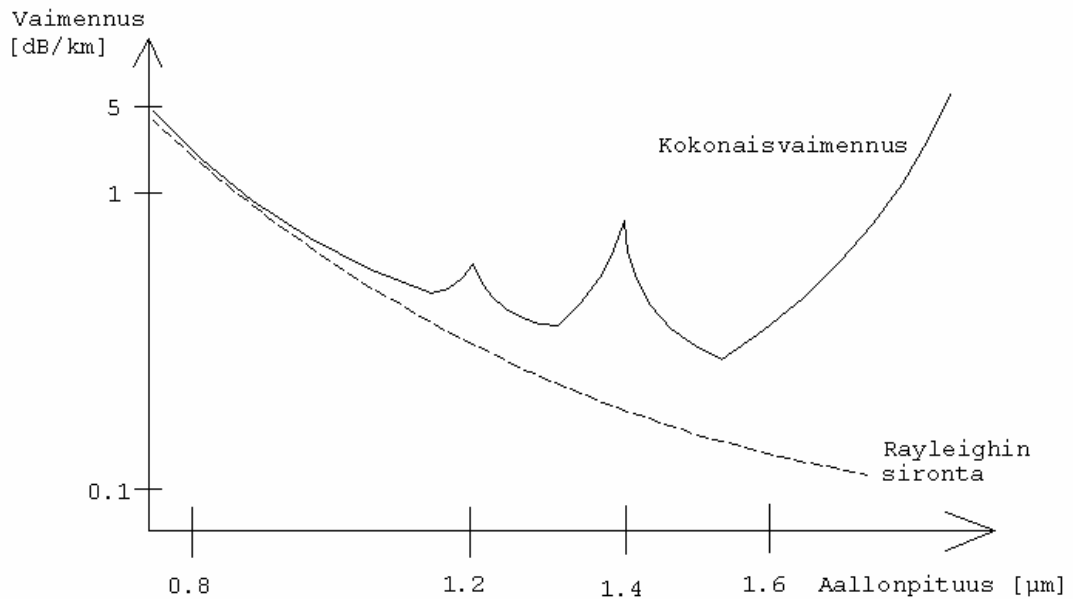
Sironta:

Valo siroaa väliaineessa olevista epähomogeenisuuskohdista moniin suuntiin. Joidenkin valonsäteiden kulma muuttuu niin paljon, että ne eivät enää heijastu ytimen ja kuoren rajapinnalta vaan tunkeutuvat kuoreen. Näin niiden osuus informaatiosta menetetään. Kun siroava alue tai molekyyli on paljon tulevan aallon aallonpituutta pienempi, puhutaan Rayleigh-sironnasta. Rayleigh-sironta on käänteisesti verrannollinen aallonpituuden neljänteen potenssiin. Sironta aiheuttaa 90 prosenttia optisen kuidun vaimennuksesta.

Taipuminen:

Taipuminen voidaan jakaa kahteen luokkaan. Makrotaipumiseksi kutsutaan tapausta, jossa optista kuitua on taivutettu liian jyrkästi. Silloin kaikki valo ei enää heijastu kuoresta takaisin ytimeen vaan osa tunkeutuu kuoreen. Makrotaipumisen vaikutus alkaa näkyä kuidun taivutussäteen ollessa alle 10 cm. Mikrotaipumiseksi kutsutaan kuidun sisäisiä geometriavirheitä kuten ytimen halkaisijan vaihtelua ja epäsymmetrisyyttä, jotka aiheuttavat jälleen sen, että osa valosta tunkeutuu kuoreen.

Häviöt kasvavat eksponentiaalisesti kuidun pituuden funktiona ja ne riippuvat voimakkaasti käytetystä aallonpituudesta. Tämä nähdään kuvasta (5).

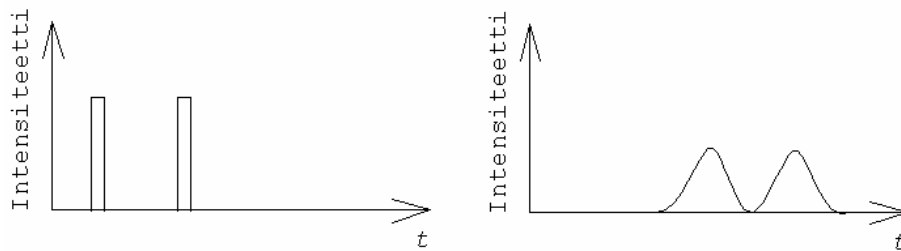


Kuva 5. Optisen kuidun vaimennus aallonpituuden funktiona. Vaimennushuiput 1.2 μm ja 1.4 μm kohdilla aiheutuvat OH^- -ioneista. Kuvasta nähdään, että Rayleigh-sironta pienenee aallonpituuden kasvaessa. Optisten kuitujen materiaalina käytetyn piidioksidin vaimennus puolestaan kasvaa voimakkaasti aallonpituuden ylittäessä 1.6 μm . /5/

Optisessa tiedonsiirrossa käytetään yleisesti kolmea aallonpituusaluetta, 850 nm, 1310 nm ja 1550 nm. Etenkin 1310 nm ja 1550 nm ympäristössä piidioksidikuidun vaimennus on pienimmillään. Muovipohjaisissa kuiduissa pienin vaimennus on 650 nm ympäristössä. Siksi muovipohjaisissa kuiduissa käytetään yleensä tätä verraten pientä aallonpituutta. /4/ ja /5/

2.1.4 Dispersio

Dispersio tarkoittaa ilmiötä, jossa eri signaalikomponentit kulkevat siirtotiellä eri nopeudella. Näin ollen ne saapuvat kuidun toiseen päähän hieman eri aikaan, jolloin pulssi madaltuu, levenee ja pyöristyy. Dispersioon vuoksi kuiduissa etenevät yksittäiset pulssit madaltuvat ja lähentyvät toisiaan, jolloin niiden erottaminen toisistaan vaikeutuu. Merkittävimmät dispersiotyypit ovat kromaattinen dispersio, moodidispersio ja polarisaatio-moodidispersio.



Kuva 6. Dispersioon vaikutus pulssin muotoon ja intensiteettiin. Vasemmalla signaali kuituun syötettäessä ja oikealla kuidusta ulos tullessa. Mitä suurempi dispersio, sitä enemmän pulssi levenee ja yksittäisten pulssien erottaminen toisistaan vaikeutuu. /6/

Kromaattinen dispersio

Optisen kuidun valmistuksessa käytetyn piidioksidin taitekerroin on taajuusriippuvainen. Siksi eri aallonpituudella olevat signaalikomponentit etenevät siinä hieman eri nopeudella. Tästä syystä eri signaalikomponentit saapuvat kuidun toiseen päähän hieman eri ajanhetkillä jolloin pulssi levenee.

Valo kulkee optisessa kuidussa ytimen lisäksi osittain myös kuoressa. Kuoressa kulkevan valon määrä, joka myös riippuu aallonpituudesta, määrää kuidun efektiivisen taitekerroimen. Efektiivinen taitekerroin on suuruudeltaan ytimen ja kuoren taitekerroimien välissä. Jos suurin osa valosta kulkee ytimestä, efektiivinen taitekerroin on lähempänä ytimen taitekerrointa. Tämä on piidioksidin taitekerroimen taajuusriippuvuuden lisäksi toinen syy siihen, miksi eri signaalikomponentit etenevät optisessa kuidussa eri nopeuksilla.

Moodidispersio

Optisessa kuidussa eri aallonpituuksia edustavat signaalikomponentit kulkevat erilaisista heijastuskulmista johtuen eripituisen matkan johtimen alkupäästä loppupäähän mennessään. Pidemmän matkan kulkeva signaalikomponentti saapuu kuidun loppupäähän myöhemmin kuin lyhyemmän matkan kulkenut komponentti. Tämän seurauksena pulssi levenee. Ilmiötä kutsutaan moodidispersioksi. Sitä esiintyy vain monimuotokuiduissa, joissa se on paljon kromaattista dispersiota voimakkaampi ilmiö. Moodidispersio onkin pääasiallinen monimuotokuidun käyttökelpoista pituutta rajoittava tekijä. Erityisen merkittävää moodidispersio on askeltaite-monimuotokuiduissa.

Polarisaatio-moodidispersio

Optisen kuidun ydin ei ole koskaan aivan täysin pyöreä. Siten signaalin eri polarisaatiot kulkevat kuidussa hieman eri nopeudella. Tämä aiheuttaa vastaavanlaisia ilmiöitä kuin aiemmin käsitellyt dispersiotyypit. Polarisaatio-moodidispersio alkaa kuitenkin olla merkittävää vasta yli 10 Gbit/s nopeuksilla. /6/

2.1.5 Optisen kuidun tiedonsiirtokapasiteetti

Siirrettäessä digitaalista signaalia optisesti, valokuituun lähetetään valodiodin tai laserin avulla lyhyitä pulsseja, jotka edustavat digitaalisessa signaalissa olevia databittejä. Signaali vastaanotetaan kuidun toiseen päähän kytketyllä valoilmaisimella, fotodetektorilla.

Optisen kuidun tiedonsiirtokapasiteetti riippuu siitä, kuinka lähellä toisiaan olevat pulssit vielä pystytään luotettavasti tunnistamaan ja erottamaan toisistaan. Tiedonsiirtokapasiteetti riippuu siis voimakkaasti kuidun dispersio-ominaisuuksista. Mitä kapeampana yksittäinen pulssi säilyy, sitä useampia pulsseja voidaan lähettää aikayksikössä eli sitä suurempaa nopeutta voidaan käyttää. /4/

2.2 Optisista lähettimistä

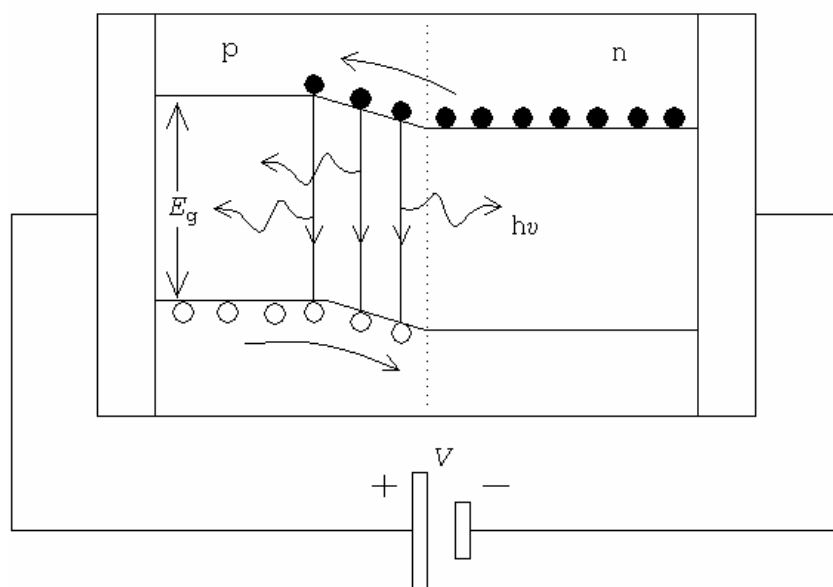
Optisessa tiedonsiirrossa käytetään kahdentyyppisiä lähettimiä. Lyhyillä etäisyyksillä ja pienemmillä siirtonopeuksilla voidaan käyttää edullisia ja yksinkertaisia valodiodeja. Etäisyyden ja siirtonopeuden kasvaessa käytetään laserdiodeja.

2.2.1 Valodiodit

Valodiodit, LED:t, ovat edullisia valonlähteitä. Ne perustuvat puolijohteen pn-rajapinnan toimintaan. Kun puolijohteeseen kytketään myötäsuuntainen jännite, enemmistövarauksenkuljettajat rajapinnan kummaltakin puolelta kulkeutuvat potentiaalikyngyksen yli. Tämän jälkeen ne edustavat vähemmistövarauksenkuljettajia. Näiden vähemmistövarauksenkuljettajien populaatio on nyt normaalia suurempi joten puhutaan vähemmistövarauksenkuljettajien injektioista. Vähemmistövarauksenkuljettajat rekombinoituvat välittömästi enemmistövarauksenkuljettajien kanssa. Elektronin siirtyminen alemmalle energiatasolle johtaa fotonin emittoitumiseen. Puhutaan niin sanotusta spontaanista emissioista. Emittoituneen fotonin energia on lähestulkoon sama kuin puolijohteen energiaraon energia eli

$$h\nu \approx E_g. \quad (7)$$

Kaavassa (7) esiintyvä h on Planckin vakio, ν on taajuus ja E_g on energiarako.



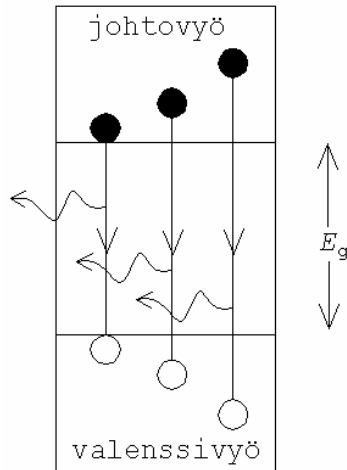
Kuva 7. Vähemmistövarauksenkuljettajien injektio ja rekombinoituminen enemmistövarauksenkuljettajien kanssa. Kun jännite V on kytketty, elektronit siirtyvät p-puolelle ja rekombinoituvat aukkojen kanssa jolloin emittoituu fotoneja. Fotonien energia $h\nu$ on lähestulkoon sama kuin energiarako E_g . N-tyyppin puolijohde on vahvasti seostettu. /4/

Käytännössä aivan kaikki varauksenkuljettajat eivät osallistu radiatiivisiin prosesseihin. Radiatiivisten rekombinaatioiden lukumäärä on kuitenkin verrannollinen kulkevaan virtaan.

Valodiodien valmistusmateriaaleina käytetään halutusta aallonpituudesta riippuen muun muassa galliumarsenidia (GaAs) ja galliumfosfidia (GaP) joihin on epäpuhtaudeksi seostettu esimerkiksi sinkkiä (Zn), piitä (Si) tai typpeä (N).

Koska elektronit ja aukot voivat kuitenkin sijaita johto- ja valenssivöissä missä kohtaa tahansa, vaihtelee emittoituneen fotonin energia pienellä välillä. Siksi valodiodien intensiteetti jakautuu leveähkölle aallonpituusvälille. Valodiodien tyypillinen

spektrinleveys on 25..125 nm mitattuna intensiteetin puolivälistä. Siksi kromaattinen- ja moodidispersio valokuiduissa käytettäessä valodiodeja muodostuvat suuriksi.



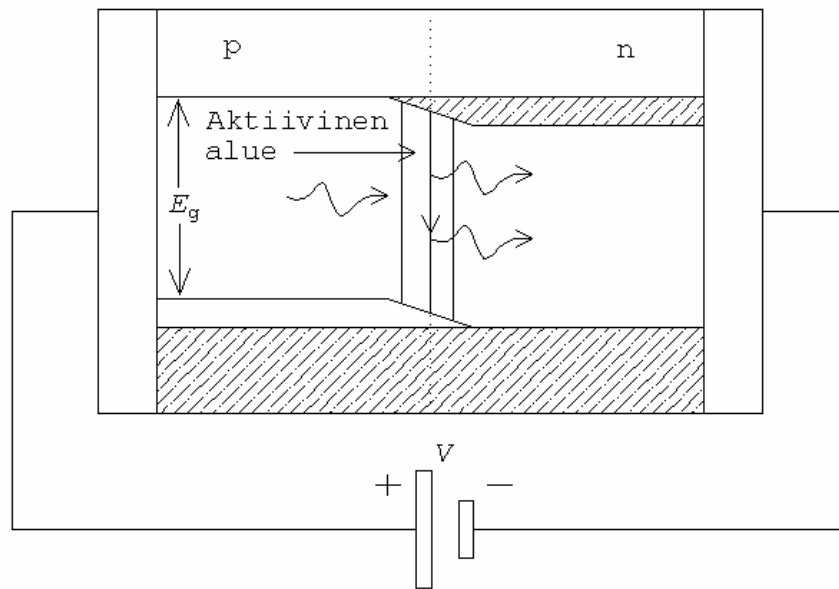
Kuva 8. Elektronit ja aukot voivat sijaita johto- ja valenssivyöissä eri kohdissa. Emittoituneen fotonin energia riippuu varauksenkuljettajien välisestä etäisyydestä. E_g on puolijohteen energiarako. /4/

Valodiodien emittoiva pinta on varsin suuri, joten ne on helppo kytkeä esimerkiksi muovipohjaiseen optiseen kuituun. Valodiodit eivät myöskään vaadi monimutkaista ohjauselektroniikkaa kuten laseriodit. Toisaalta emittoituvan valon intensiteetti on verraten pieni, joka dispersion ohella rajoittaa siirtoetäisyyttä. /4/

2.2.2 Laserdiodit

Puolijohdelaser on periaatteessa rakenteeltaan samankaltainen kuin valodiodi. Lasertoiminnan synnyttämiseksi tarvitaan lisäksi optinen resonaattori ja käänteismiehityksen aikaansaaminen.

Huoneen lämpötilassa puolijohteen ylempi viritystila on lähes tyhjä. Fotoni emittoituu elektronin siirtyessä ylemmältä energiatilalta alemmalle energiatilalle. Käänteismiehityksellä tarkoitetaan tilannetta, jossa suurin osa elektroneista on nostettu ylempään energiatilaan. Elektronien nostamista ylempään energiatilaan kutsutaan pumppaukseksi ja se voidaan toteuttaa esimerkiksi injektoimalla puolijohteeseen varauksenkuljettajia myötäsuuntaisen virran avulla.

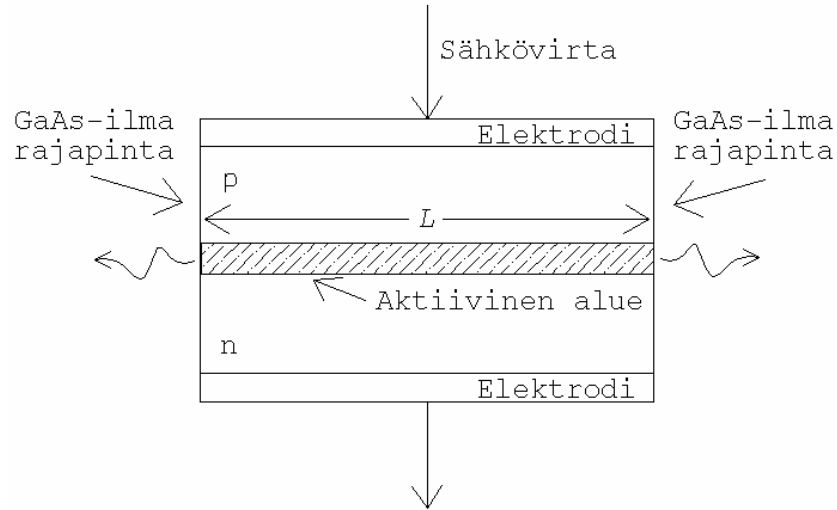


Kuva 9. Stimuloitu emissio puolijohteessa. Käänteismiehitys aikaansaadaan riittävällä myötäsuuntaisella virralla. Aktiivinen alue, alue johon käänteismiehitys on syntynyt, on pn-liitoksen rajapinnalla. Kun aktiiviselle alueelle saapuu fotoni, se pudottaa elektronin alemmalle energiatilalle jolloin syntyy uusi fotoni, jolla on sama vaihe, aallonpituus ja suunta kuin saapuvalla fotonilla. Tätä kutsutaan stimuloituksi emissioksi. Pienillä virroilla stimuloitua emissiota ei tapahdu ja laserdiodi toimii samoin kuin LED. Kuvan varjostettu alue edustaa elektroneja. /4/

Stimuloidun emission syntyminen on esitetty kuvassa (8). Kun käänteismiehitetylle alueelle saapuu fotoni, se pudottaa elektronin korkeammalta energiatilalta alemmas. Toisin sanoen saapuva fotoni aiheuttaa välittömän rekombinaation. Seurauksena syntyy uusi fotoni, jolla on sama vaihe ja aallonpituus kuin saapuvalla fotonilla.

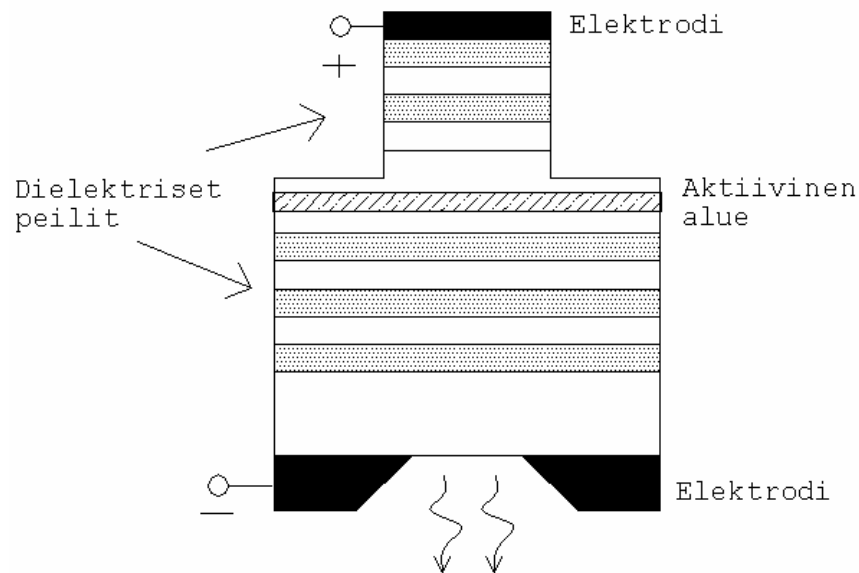
Lasertoiminnan aikaansaamiseksi tarvitaan lisäksi optinen resonaattori, jolla saadaan stimuloidun emission intensiteetti nostettua korkeammaksi. Resonaattori voidaan toteuttaa esimerkiksi seuraavasti.

Galliumarsenidikiteen päädyt leikataan tasaisiksi ja kiillotetaan jolloin GaAs-ilma -rajapinnalle syntyy heijastus. Spontaanin emission tuloksena syntyy fotoneja samoin kuin valodiodeissa. Osa näistä fotoneista heijastuu rajapinnoilta ja synnyttää uusia fotoneja aktiivisella alueella stimuloidun emission tuloksena. Syntyneet fotonit heijastuvat jälleen rajapinnoilta ja synnyttävät lisää fotoneja. Näin valon intensiteetti vahvistuu resonaattorissa. Syntyvän valon aallonpituus määräytyy resonaattorin pituuden mukaan.



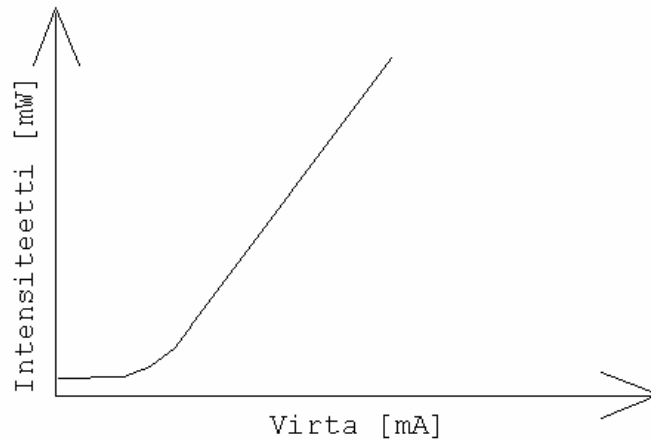
Kuva 10. Tyypillinen GaAs- laser. Sähkövirta kulkee kohtisuoraan optista resonaattoria vasten. Heijastimina toimivat GaAs-ilma –rajapinnat. Resonaattorin pituus L vaikuttaa valon aallonpituuteen. Valo lähtee komponentin sivuista, joten tällaista laseria kutsutaan sivuemittoivaksi laseriksi. /4/

Muutamia vuosia sitten tuli markkinoille uusi puolijohdelasertyyppi, jota kutsutaan nimellä VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Siinä optisen resonattorin muodostavat dielektriset peilit, joissa on peräkkäin vuorotellen suuren ja pienen taitekertoimen omaavia kerroksia. Kerrosten paksuus on neljäsosa aallonpituudesta. Tällaiset peilit ovat erittäin selektiivisiä, jonka seurauksena resonattorissa syntyvä valo on hyvin monokromaattista. VCSEL-laserit kuluttavat vähän virtaa, ovat pienikokoisia, syttyvät ja sammuvat nopeasti ja ovat edullisia valmistaa. Näiden ominaisuuksien vuoksi VCSEL-lasereita on alettu käyttämään yhä enemmän nopeassa tiedonsiirrossa.



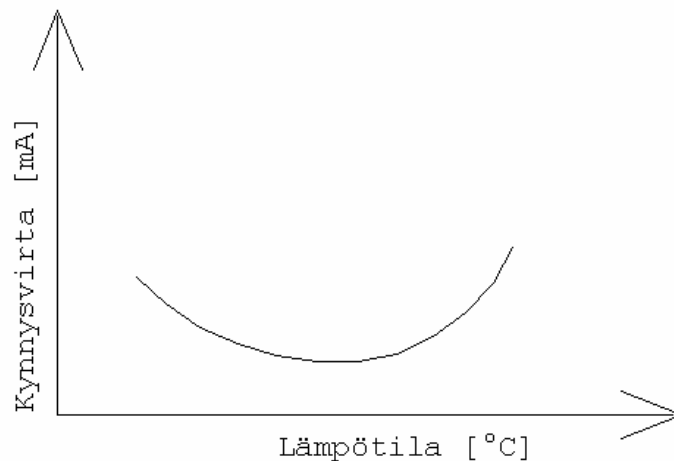
Kuva 11. VCSEL-laserin rakenne. VCSEL-laserissa optinen resonattori on samansuuntainen sähkövirran kanssa. Heijastimina käytetään dielektrisiä peilejä. Niissä on peräkkäin vuorotellen suuren ja pienen taitekertoimen omaavia kerroksia, joiden paksuus on neljäsosa aallonpituudesta. Valo lähtee komponentin päädystä, mutta koska komponentti on hyvin lyhyt, puhutaan pintaemittöivasta laserista. Koska optinen resonattori on erittäin lyhyt, syntyvän spektrin leveys on hyvin pieni. /6/

Laserdiodien tuottaman valon intensiteetti riippuu virran suuruudesta ja komponentin käyttöiästä. Laserdiodin vanhetessa on tietyn intensiteetin tuottamiseksi käytettävä suurempaa virtaa kuin aluksi. Siksi tarvitaan suhteellisen monimutkaista ohjauselektroniikkaa ja takaisinkytkentä, jotka pitävät valotehon vakiona. Laserdiodi toimii kuten valodiodi tiettyyn kynnysvirtaan saakka. Kun tämä piste saavutetaan, valoteho kasvaa voimakkaasti ja valon spektri kapenee. Kynnysvirran jälkeen laserdiodin tuottama valoteho riippuu lähes lineaarisesti käytetystä virrasta, kunnes saavutetaan laserdiodin maksimivirta. Tämän pisteen jälkeen valoteho alkaa jälleen laskea. /4/ ja /6/



Kuva 12. Laserdiodin tuottama valoteho syötettävän virran funktiona. Kun virta ylittää niin sanotun kynnysvirran, kasvaa valoteho voimakkaasti ja samalla valon spektri kapenee. /6/

Laserdiodin kynnysvirta on lämpötilariippuvainen. Laserdiodin pitämiseksi lineaarisella toiminta-alueellaan on komponentille syötettävää virtaa säädettävä lämpötilan mukaan.



Kuva 13. Tyypillisen laserdiodin kynnysvirran lämpötilariippuvuus. Lämpötilan vaihdelta on komponentille syötettävää virtaa muutettava, jotta pysytään aina diodin kynnysvirran yläpuolella. /12/

2.3 Valoilmaisimista

Valoilmaisin muuttaa optisen signaalin sähkövirraksi tai –jännitteeksi. Optisessa tiedonsiirrossa valoilmaisinina käytetään pääasiassa fotodiodeja niiden pienen koon, nopeuden ja herkkyyden vuoksi. Suurilla siirtoetäisyyksillä valoilmaisimen on oltava hyvin herkkä, jotta heikko signaali saadaan vielä havaittua.

2.3.1 Pn-fotodiodit

Pn-fotodiodiin saapuvat fotonit absorboituvat valenssivyöllä oleviin elektroneihin. Mikäli fotonien energia on vähintään energiaraon E_g suuruinen, saavat elektronit riittävästi energiaa noustakseen johtovyöhön. Valenssivyöhön jää tällöin aukko. Yksi foton voi synnyttää vain yhden elektronin. Kun pn-liitoksen yli kytketään estosuuntainen jännite, tyhjennysalueella tai sen lähellä olevat elektronit ajautuvat n-tyyppin puolijohteeseen ennen kuin ne ehtivät rekombinoitua aukkojen kanssa p-tyyppin puolijohteessa. Liikkuvat varauksenkuljettajat muodostavat sähkövirran. Kun elektroni on ajautunut tyhjennysalueelta n-tyyppin puolijohteeseen, elektroni siirtyy jännitelähteeseen. Vastaavasti tyhjennysalueelta p-tyyppin puolijohteeseen ajautunut

aukko rekombinoituu jännitelähteestä saapuvan elektronin kanssa. Diodin läpi kulkeva virta riippuu syntyneiden elektronien määrästä.

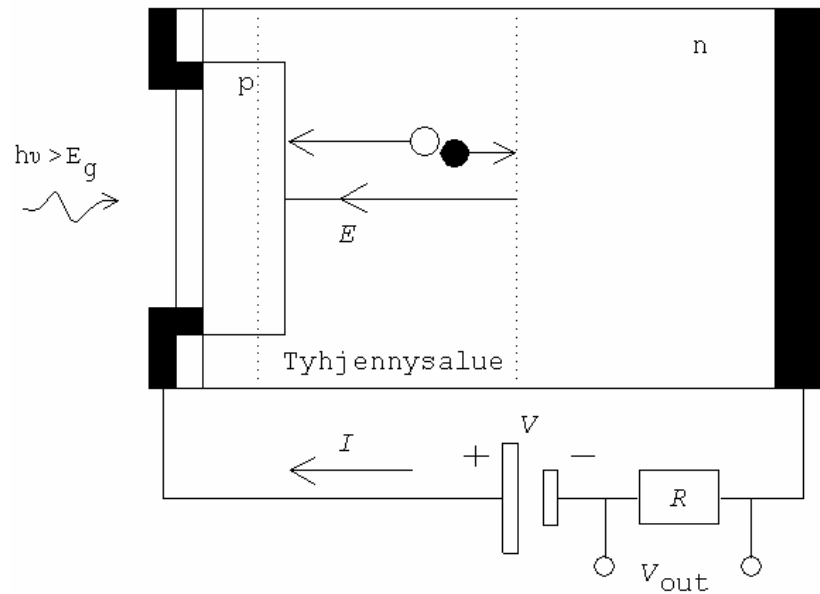
Kaavan (8) avulla voidaan laskea, mikä suuruinen on puolijohteen energiaraon oltava, jotta siitä voidaan valmistaa tietyn aallonpituusalueen ilmaisim.

$$h \cdot \nu \geq E_g, \quad (8)$$

jossa h on planckin vakio, ν on fotonin taajuus ja E_g energiarao. Taajuuden ja aallonpituuden yhteys on

$$\nu = \frac{1}{\lambda} \cdot c, \quad (9)$$

jossa ν on taajuus, c on valonnopeus ja λ on aallonpituus.



Kuva 14. Pn -fotodiodin rakenne. Fotoni voi nostaa elektronin valenssivyöstä johtovyöhön jolloin valenssivyöhön jää aukko. Kun pn-liitoksen yli on kytketty estosuuntainen jännite V , tyhjennysalueella tai sen lähellä olevat elektronit ajautuvat syntyneen sähkökentän E vaikutuksesta n-tyypin puolijohteeseen. Liikkuvat varauksenkuljettajat synnyttävät sähkövirran, joka voidaan laskea yksinkertaisesti tunnetun vastuksen R yli vaikuttavan jännitteen V_{out} perusteella. /4/

Pn-fotodiodeissa tyhjennysalue on kapea, jolloin suurin osa suurilla aallonpituuksilla saapuvista fotoneista absorboituu tyhjennysalueen ulkopuolella. Tällöin ei synny diodin läpi kulkevaa sähkövirtaa. Pn-fotodiodien tyhjennysalueen kapasitanssi on varsin suuri, mikä estää hyvin nopeiden pulssien ilmaisun. /4/ ja /6/

2.3.2 Pin-fotodiodit

Pin-fotodiodit eroavat pn-fotodiodeista siten, että niissä kapeiden p- ja n-tyyppin puolijohdeiden väliin on muodostettu leveä, hyvin heikosti seostettu itseispuolijohdealue. Tyhjennysalue on koko itseispuolijohdealueen kokoinen, jolloin suurillakin aallonpituuksilla olevat fotonit absorboituvat tyhjennysalueella ja synnyttävät näin sähkövirran. Pin-fotodiodin kapasitanssi on pienehkö, sillä leveän tyhjennysalueen molemmiin puolin on hyvin ohut varauskerros. Pn-fotodiodissahan kaikki varaukset ovat kerrostuneet yhdelle rajapinnalle. Pienen kapasitanssin ansiosta pin-fotodiodeilla voidaan ilmaista varsin nopeita pulsseja. /4/

2.3.3 Vyöryfotodiodit

Edellä mainittujen ilmaisimien herkkyyttä kuitenkin rajoittaa se seikka, että yksi fotoni voi absorboituessaan synnyttää vain yhden elektronin. Mikäli syntynyt elektroni vieään hyvin suureen sähkökenttään, se voi saada tarpeeksi energiaa synnyttääkseen niin sanotun törmäysionisaation. Tätä ilmiötä hyödyntää vyöryfotodiodi. Se on erittäin nopea ilmaisimien jonka vahvistuskerroin voi olla jopa 1000.

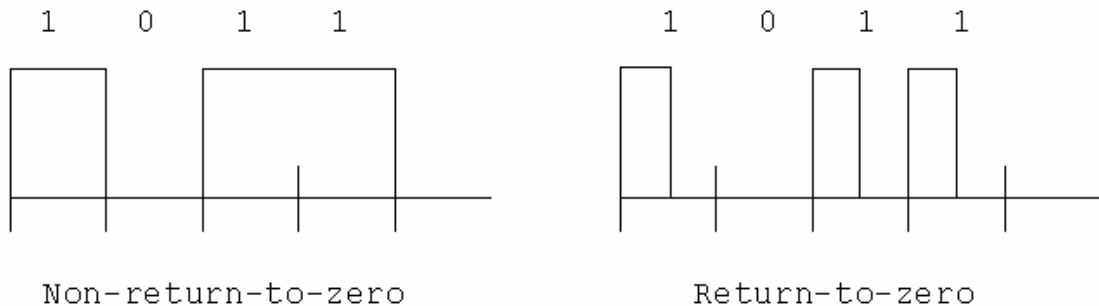
Vyöryfotodiodin rakenne muistuttaa pin-fotodiodia. Kapean n- ja leveän itseispuolijohdealueen välissä on kuitenkin kolme p-tyyppin kerrosta, jotka vaikuttavat sähkökentän jakautumiseen diodin sisällä. Kentänvoimakkuus on maksimissaan kapean n- ja itseispuolijohdealueen välissä ja katoaa p-tyyppin puolijohdealueen ulkoreunalla. Elektronit saavat sähkökentässä niin suuren kineettisen energian, että ne voivat törmätessään ionisoida kovalenttisia sidoksia itseispuolijohdealueella vapauttaen tällöin elektroni-aukkopareja. Kun näille uusille elektroni-aukkopareille annetaan tarpeeksi energiaa, ne voivat synnyttää jälleen lisää elektroni-aukkopareja. Tästä tulee nimitys vyöryfotodiodi.

/4/

2.4 Digitaalisen signaalin moduloinnista ja demoduloinnista

2.4.1 Modulointi

Haluttaessa siirtää digitaalista informaatiota optisessa kuidussa, täytyy data muuntaa sopivaksi optiseksi signaaliksi. Tätä prosessia kutsutaan moduloinniksi. Optisessa tiedonsiirrossa käytetään päälle-pois –tyyppistä modulointia. Siinä bittiä 1 vastaa valon kytkeminen päälle ja bittiä 0 valon kytkeminen pois päältä. Modulointi voidaan tehdä joko suoraan kytkemällä valonlähdettä päälle ja pois, tai erillisellä valonlähteen eteen kytketyllä modulaattorilla.



Kuva 15. Kaksi yleisimmin optisissa kuiduissa käytettävää modulointitapaa. Non-return-to-zero –moduloinnissa valopulssi pysyy päällä niin kauan kuin ykkösbittejä esiintyy. Return-to-zero –moduloinnissa pulssi kestää aina puolen bittivälin ajan palaten tämän jälkeen takaisin nollatilaan. /6/

Return-to-zero, RZ –tyyppisessä moduloinnissa valokuituun syötetään bitin 1 ollessa kyseessä puolen bittivälin pituinen pulssi. Jos kaksi ykkösbittiä esiintyy peräkkäin, pimenee valonlähde puolen bittivälin ajaksi ja syttyy taas uudelleen puolen bittivälin ajaksi.

Non-return-to-zero, NRZ –tyyppisessä moduloinnissa valopulssi kestää aina koko bittivälin ajan. Jos useampi ykkösbitti esiintyy peräkkäin, valopulssi kestää niin kauan kunnes tulee seuraava nollabitti. Silloin valonlähde pimenee ja pysyy pimeänä seuraavaan ykkösbittiin saakka.

Yleisimmin käytössä on NRZ-modulointi, joka kuluttaa vain noin puolet RZ-moduloinnin kaistanleveydestä. NRZ-moduloinnin ongelmana on se, että koska pitkien 1- tai 0-sarjojen aikana ei lähetetä mitään, on vastaanottimen vaikea synkronoitua lähettäjän kanssa. RZ-moduloinnissa pulsseja lähetetään jatkuvasti lukuun ottamatta pitkiä 0-sarjoja.

Jotta signaalin tila voidaan luotettavasti tunnistaa ja lähetin ja vastaanotin tahdistaa toisiinsa, pitää kaikkien mahdollisten bittisarjojen lähetyksessä käytetyn keskimääräisen tehon olla vakio. Toisin sanoen lähetettyjen ykkösten ja nollien lukumäärän pitää olla sama. Tämä onnistuu datan koodauksella.

Eräs yleinen koodaustapa on (8,10)-koodaus, jossa kahdeksan databitin sarja koodataan aina kymmenen bitin sarjaksi. Tässä kymmenen bitin sarjassa on aina yhtä suuri määrä ykkösiä ja nolliä, riippumatta alkuperäisestä kahdeksan bitin sarjasta. /6/

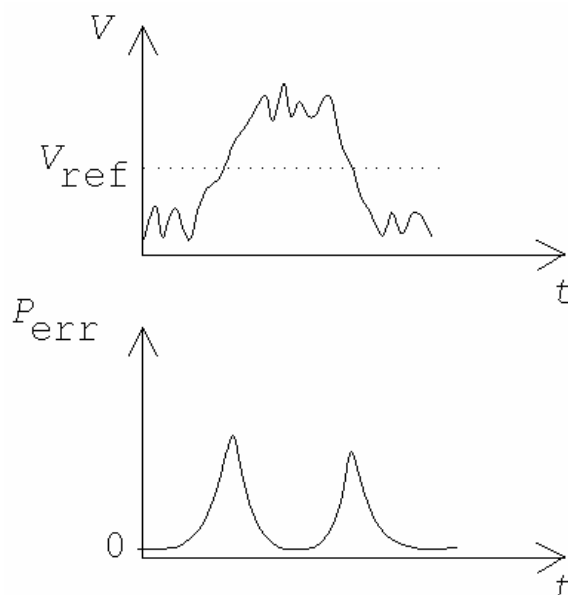
2.4.2 Demodulointi

Kuljettuaan optisessa kuidussa moduloitu signaali saapuu vastaanottimeen hieman vaimentuneena ja vääristyneenä. Pulssien leveneminen dispersion takia vaikeuttaa yksittäisten pulssien erottamista toisistaan. Kohina puolestaan vaikeuttaa signaalin tunnistamista loogiseksi ykköseksi tai nollaksi.

Valoilmaisimien muuntaa optisen signaalin takaisin sähköiseksi signaaliksi. Tämän jälkeen vastaanottimen tehtävänä on päättää vastaako saapuva signaali bittiä 0 vai 1.

Jotta bittijonot voidaan tunnistaa, on lähettimen ja vastaanottimen toimittava samassa tahdissa. Koska erillisen kellosignaalin kuljettaminen vaatisi kohtuuttomasti kaistanleveyttä, muodostaa vastaanotin tarvitsemansa kellosignaalin saapuvan datan perusteella. Tässä kellosignaalin muodostamisessa voi kuitenkin tapahtua virheitä muun muassa datapulssien levenemisen takia. Kellosignaalin virhettä kutsutaan ajoituskohinaksi (engl. jitter).

On erittäin tärkeää, että signaalia koetetaan tunnistaa juuri oikeaan aikaan. Tunnistusvirheen todennäköisyys on suuri pulssin reunoilla. Ajoituskohina voi aiheuttaa sen, että signaalia ei lueta pulssien keskeltä vaan reunoilta, joissa todennäköisyys tunnistusvirheelle on suuri.



Kuva 16. Signaalin tunnistaminen. Vastaanotin vertaa saapuvan signaalin arvoa referenssitason V_{ref} tietyllä ajanhetkellä (ylempi kuvaaja). Alemmassa kuvaajassa esitetyn tunnistusvirheen todennäköisyys P_{err} on suurimmillaan pulssin reunoilla. /7/

Tiedonsiirron aikana syntyvien siirtovirheiden määrää kuvaa virhekerroin, ns. BER-luku (engl. Bit Error Rate). Nopeassa optisessa tiedonsiirrossa tämän luvun tulee olla esimerkiksi pienempi kuin 10^{-12} , eli jokaista siirrettyä terabittiä kohti sallitaan korkeintaan yksi bittivirhe. /6/ ja /7/

2.5 Siirtojohtoista

Suurilla taajuuksilla johtimet ja passiiviset komponentit käyttäytyvät eri tavoilla kuin pienillä taajuuksilla. Esimerkiksi tyypillinen kapea piirilevyveto, joka tasavirtapiirissä tehokkaasti oikosulkee kaksi pistettä toisiinsa, vaikuttaa suurilla taajuuksilla lähinnä induktanssilta.

Siirtojohdoksi kutsutaan järjestelmän eri osien välistä johtavaa yhteyttä jossa siirretään signaaleja. Signaalin saapuessa siirtojohtoon, jonka impedanssi ei ole sama kuin lähettävän pisteen impedanssi, signaali heijastuu osittain takaisin lähteeseen. Vastaavasti, jos siirtojohdon ominaisimpedanssi eroaa kohteen impedanssista, osa signaalista heijastuu johdon loppupäästä takaisin johtoon. Johdon toisesta päästä heijastunut signaali voi heijastua jälleen takaisin johtoon ja niin edelleen. Heijastuneet aallot summautuvat pääaaltoon ja vääristävät siirrettävän signaalin aaltomuotoa. Nämä haitalliset heijastukset pyritään minimoimaan sovittamalla signaalin lähteen, siirtotien ja kohteen impedanssitason toisiinsa, sillä heijastus tapahtuu vain eri impedanssitasojen rajapinnoista.

Piirilevyvedon ominaisimpedanssille voidaan laskea approksimaatio kaavalla (10). Mitat kaavaan tulee syöttää tuumina.

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \cdot \ln \frac{5.98 \cdot h}{0.8 \cdot w + b}, \quad (10)$$

jossa h on johtimen etäisyys maatasosta, w on johtimen leveys ja b johtimen paksuus. ϵ_r on piirilevymateriaalin suhteellinen permittiivisyys. /8/ Käytettävän johtimen leveys riippuu siis halutun impedanssitason lisäksi myös piirilevyn valmistusmateriaaleista ja rakenteesta.

Jotta heijastusta siirtojohdon loppupäässä ei tapahdu, tulee siirtojohto päättää ominaisimpedanssinsa suuruiseen impedanssitasoon.

Sovitetuissa siirto johdoissakin tapahtuu aina jonkin verran häviöitä. Häviöt voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan; kuparihäviöihin, dielektrisiin häviöihin ja induktiivisiin häviöihin.

Kuparihäviöt aiheutuvat johteen resistanssista, joka on muun muassa virranahdon vuoksi voimakkaasti taajuusriippuvainen. Siksi siirrettävä signaali kulkiessaan johteessa paitsi vaimenee, myös vääristyy. Signaalin vääristyminen johtuu siitä, että eri taajuiset signaalikomponentit etenevät hieman eri nopeuksilla ja vaimentuvat hieman eri määrän toisiinsa nähden.

Dielektriset häviöt aiheutuvat väliaineiden, kuten esimerkiksi piirilevyjen kuparitasojen välisen materiaalin, häviöllisyydestä. Dielektriset häviöt riippuvat väliaineen yli vaikuttavasta jännitteestä ja käytetystä taajuudesta.

Induktiiviset häviöt aiheutuvat muuttuvan virran ansiosta johtimen ympärille syntyvien magneettikenttien kytkeytymisestä lähellä kulkeviin johtimiin.

Kaikki edellä mainitut häviöt kasvavat taajuuden kasvaessa. /8/ ja /9/

3 LAITTEISTON SUUNNITTELU

3.1 Johdanto

Signaalinmonistimen toimintaperiaate on varsin yksinkertainen. Laitteisto koostuu useasta kahdesta neljään tai kahdesta kahdeksaan –tyyppisestä moduulista. Jokaisen moduulin tehtävänä on vastaanottaa kahdesta valokuidusta 1.6 Gbit/s nopeudella saapuva informaatio ja lähettää tämä sama data neljään tai kahdeksaan valokuitulinjaan. Suuren datamäärän siirtäminen ja käsitteleminen nopeasti ja virheettömästi on kuitenkin vaativaa. Tavoitteena on suunnitella laite, joka aiheuttaa mahdollisimman vähän virheitä siirrettävään dataan. Laitteen virhekerroin, BER-luku, tulee saada pienemmäksi kuin 10^{-12} , eli laite saa aiheuttaa korkeintaan yhden bittivirheen jokaista siirrettyä terabittiä kohti.

3.2 Testauslaite

Suunnitellaan aluksi testauslaite signaalinmonistimen kehitystyön avuksi. Testauslaite lähettää valokuituun satunnaista dataa 1.6 Gbit/s nopeudella. Lisäksi laite vastaanottaa dataa samalla nopeudella ja vertaa lähetettyä ja vastaanotettua bittivirtaa toisiinsa.

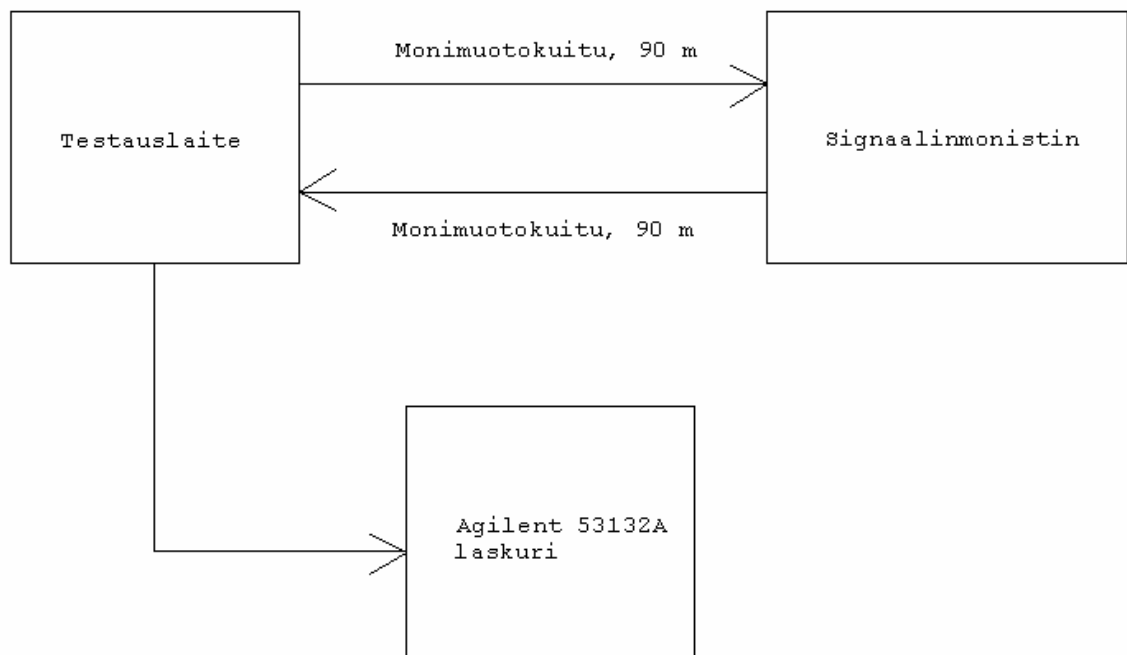
Aluksi testauslaitteeseen kytketään ainoastaan 90 m pituinen valokuitu molemmista päistään. Näin voidaan tutkia testauslaitteen toimintaa ja ominaisuuksia. Myöhemmin valokuidun toiseen päähän kytketään signaalinmonistin. Signaalinmonistin vastaanottaa testauslaitteen generoiman informaation ja lähettää vastaanottamansa informaation toisen 90 m pituisen optisen kuidun välityksellä takaisin testauslaitteeseen, jossa lähetettyä ja vastaanotettua signaalia verrataan toisiinsa. Testauslaite ilmoittaa mahdollisista eroista, siis bittivirheistä. Mittausajan, siirtonopeuden ja virheiden määrän perusteella voidaan laskea laitteen virhekerroin.

$$BER = \frac{k}{BPS \cdot t}, \quad (11)$$

jossa BER on virhekerroin, k on virheiden lukumäärä, BPS on siirtonopeus ja t mittausaika.

3.2.1 Testauslaitteen toiminta ja rakenne

Testauslaitteen pääosat ovat Honeywellin HFE4190-541 VCSEL-laserdiodi, Honeywellin HFD3180-102 pin-fotodiodi, Maximin MAX3996 laserohjain ja MAX3269 vahvistinpiiri. Lisäksi kytkentään kuuluu Texas Instrumentsin TLK2501 lähetinvastaanotin. TLK2501 pystyy vertaamaan lähetettyä ja saapuvaa bittivirtaa ja ilmoittamaan havaituista eroista antamalla pulsseja virhelinjaan. Näiden pulssien määrä, joka vastaa bittivirheiden määrää mittausaikana, lasketaan Agilent 53132A laskurilla. Testausjärjestely on esitetty kuvassa (17).



Kuva 17. Signaalimonistimen testausjärjestely. Testauslaite generoi satunnaista bittivirtaa, jota syötetään monistimeen. Monistimesta informaatio lähetetään takaisin testauslaitteeseen, joka vertaa lähetettyä ja vastaanotettua bittivirtaa toisiinsa. Lähetetyn ja vastaanotetun bitin erotessa toisistaan, eli bittivirheen ilmaantuessa, testauslaite lähettää pulssin virhelinjaan. Pulssien lukumäärä lasketaan Agilent 53132A laskurilla.

Testauslaitetta, jonka piirikaavio on esitetty liitteessä I, ohjaa TLK2501. Se generoi satunnaista, (8,10)-koodattua bittivirtaa ja lähettää sitä MAX3996 laserohjaimelle 1.6 Gbit/s nopeudella. 1.6 Gbit/s nopeuden saavuttamiseksi täytyy TLK2501:n sisäisen kellotaajuuden olla 800 MHz, sillä piiri käyttää sekä kellopulssin nousevaa että laskevaa reunaa. Tämä taajuus saavutetaan kertomalla ulkoisen 80 MHz kideoskillaattorin taajuus TLK2501:ssä kymmenellä. /10/

Laserohjaimella MAX3996 ja kolmella vastuksella asetetaan laserdiodin biasointivirta, lämpötilakompensointi ja modulointivirta. Ohjain pyrkii pitämään laserdiodin lähettämän keskimääräisen valotehon vakiona säätämällä virtaa laserdiodin yhteydessä olevan fotodiodin mittaaman valotehon perusteella. Ohjain moduloi laserdiodia non-return-to-zero -tyyppisesti.

Lähettimeä käytetään HFE4190-541 VCSEL-laserdiodia. Sen biasointivirraksi asetetaan 6.5 mA ja modulointivirraksi 4.8 mA. Koska laserdiodin toimintapiste liikkuu lämpötilan funktiona, on tarpeen käyttää lämpötilakompensointia. Lämpötilakompensointi ja modulointivirta asetetaan komponenttien datalehdissä /10/ ja /12/ annettujen kaavojen (12) ja (13) perusteella.

$$R_{TC} = \frac{0.22}{tc/10^6 \cdot i_{mod}} - 250 \Omega \quad (12)$$

$$R_{MOD} = \frac{tc/10^6 (R_{TC} + 250 \Omega) \cdot 52}{(0.19 - 48 \cdot tc/10^6)} - 250 \Omega \quad (13)$$

Vastus R_{TC} määrää modulointivirran lämpötilakompensoinnin ja R_{MOD} modulointivirran perustason.

Parametri tc on laserdiodin lämpötilakerroin. HFE4190-541 -laserdiodin tapauksessa kerroin on 3000 ppm/°C. Haluttaessa modulointivirran olevan 4.8 mA, saadaan vastusten arvoiksi $R_{TC} = 15.0 \text{ k}\Omega$ ja $R_{MOD} = 51.5 \text{ k}\Omega$.

Laserdiodin biasointivirta asetetaan fotodiodin ja maatasen välisen vastuksen avulla. Laserohjain pitää fotodiodin jännitteen aina 1.1 voltissa. Sopiva vastusarvo määräytyy Ohmin lain perusteella, kun tunnetaan fotodiodilta saatava virta laserdiodin eri ulostulotehoilla. Tässä tapauksessa sopiva vastusarvo asetetaan kuitenkin mittausten perusteella. Sopiva biasointivirta, 6.5 mA, saadaan asettamalla vastusarvoksi 4.4 k Ω .

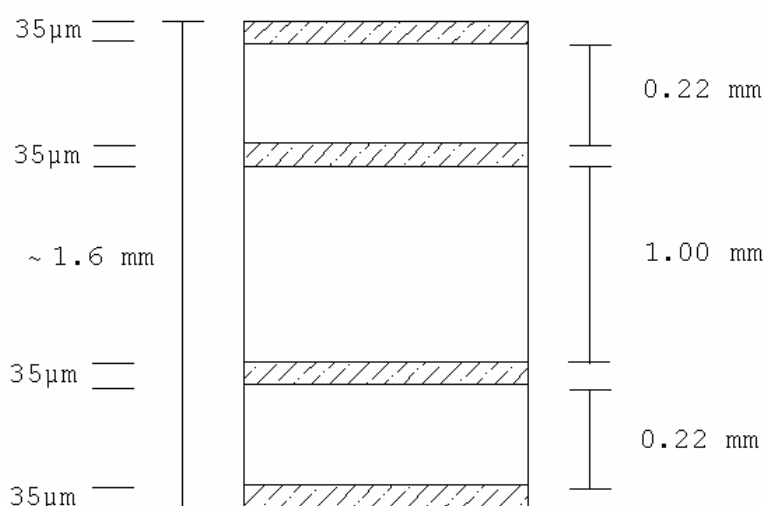
Signaalin siirtotienä käytetään Suhner Fiberoptics -yhtiön valmistamaa optista parikaapelia, jonka pituus on 90 m ja ilmoitettu häviökerroin 2.3 dB/km.

Vastaanottimena käytetään HFD3180-541 -vastaanotinta, joka on tyypiltään pin-fotodiodeja. Vastaanotin sisältää myös esivahvistimen. Esivahvistimelta data vietään MAX3269 vahvistimelle jossa signaalia suodatetaan ja vahvistetaan. Tämän jälkeen informaatio saapuu takaisin TLK2501-piirille, joka tulkitsee jokaisen saapuvan bitin joko loogiseksi ykköseksi tai nollassi. Lisäksi TLK2501 vertaa lähetettyä ja vastaanotettua bittivirtaa keskenään ja ilmoittaa bittivirheistä lähettämällä pulssin "RX_ERR" -linjaan bittivirheen ilmaantuessa.

3.2.2 Testauslaitteen layout

Toimittaessa varsin suurilla taajuuksilla, on komponentit sijoitettava lähelle toisiaan, jotta signaalilinjat voidaan suunnitella mahdollisimman suoriksi ja lyhyiksi. Siten saadaan minimoitua haitalliset heijastukset, jotka voivat heikentää laitteiston suorituskykyä. Usein pyritään käyttämään sovitettuja siirtolinjoja.

Testauslaite valmistetaan nelikerroksiselle piirilevyille, jonka leveys on 75 mm ja pituus 45 mm. Nopeat signaalilinjat sijaitsevat yläkerroksessa, toisessa kerroksessa sijaitsee maataso. Kolmas kerros on varattu käyttöjännitteille ja alakerrokseen on sijoitettu suodatuskondensaattoreita ja muita komponentteja, jotka eivät varsin tiheästi kalustetulle yläkerrokselle mahdu. Alakerrosta käytetään lisäksi yhdistämään vaikeissa paikoissa sijaitsevia kohteita toisiinsa. Piirilevymateriaalina on yleisesti käytetty FR-4.

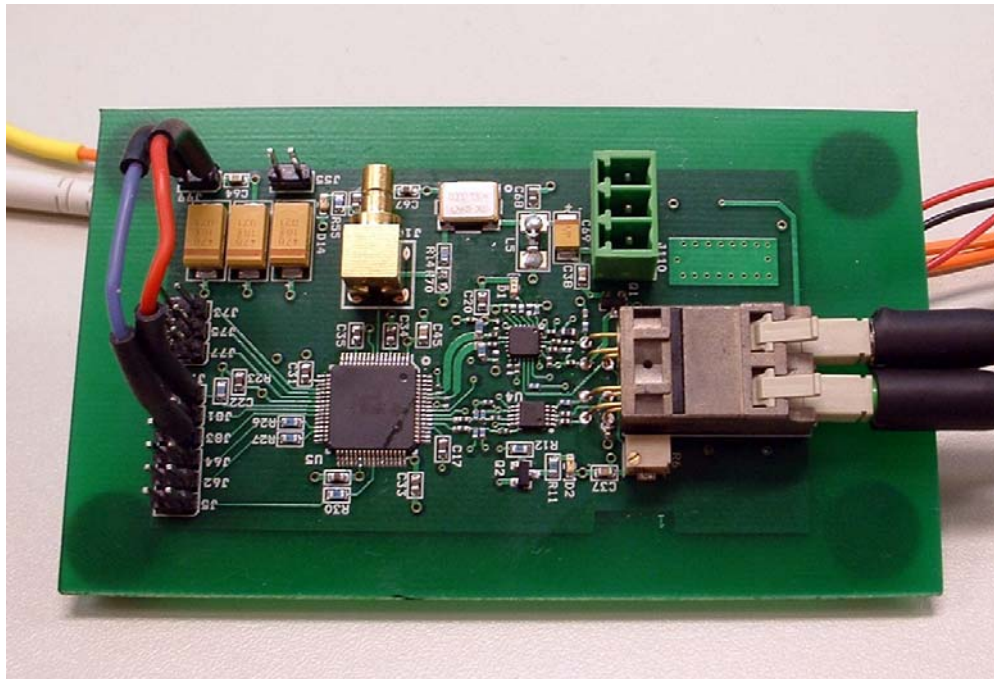


Kuva 18. Käytetyn nelikerrospiirilevyn rakenne. Viivoitetut alueet kuvaavat kuparitasoja. Nelikerrospiirilevy valmistetaan kiinnittämällä 1 mm paksuisen kaksipuolisen levyn pintoihin 0.22 mm paksuiset eristekalvot, joiden ulkopinnalla on kuparifolio. /8/

Nopeille signaaleille suunnitellaan siirtolinjat. Piirilevyytojen impedanssi lasketaan kaavalla (10). Jotta vältetään heijastuksilta impedanssin epäjatkuvuuskohdissa, tulee siirtolinjan impedanssitason olla sama kuin lähteen antoimpedanssi ja kohteen tuloimpedanssi. Kun piirilevyn parametrit ovat $\epsilon_r = 4.5$, $h = 0.22$ mm, $b = 35$ μm ja haluttu impedanssitaso

$Z_0 = 50 \Omega$, saadaan sopivaksi johtimen leveydeksi w noin 0.4 mm. Lyhyissä vedoissa ja ahtaissa paikoissa käytetään kuitenkin tästä poikkeavia johdinleveyksiä.

Siirtolinjat päätetään 50Ω vastuksilla. Jotta tehoa ei kuluisi näissä terminointivastuksissa kovin paljon hukkaan, on vastukset maatasen asemasta kytketty 1.24 V jännitetasoon, joka muodostetaan Texas Instrumentsin operaatiovahvistinta OPA569AIDWP käyttämällä. Operaatiovahvistimen tuottama jännite asetetaan vastusjännitejaon avulla. Operaatiovahvistin toimii tässä tapauksessa yksinkertaisena jänniteseuraajana. Jännite 1.24 V valitaan MAX3269:n datalehden /13/ perusteella.



Kuva 19. Testauslaite, mitoiltaan 75 mm x 45 mm, yläpuolelta kuvattuna. Laitteen nopeuden määräävä kello-signaali generoidaan joko piirikortille asennetulla kideoskillaattorilla tai se voidaan tuoda ulkoisesta signaaligeneraattorista.

3.3 Signaalinmonistin

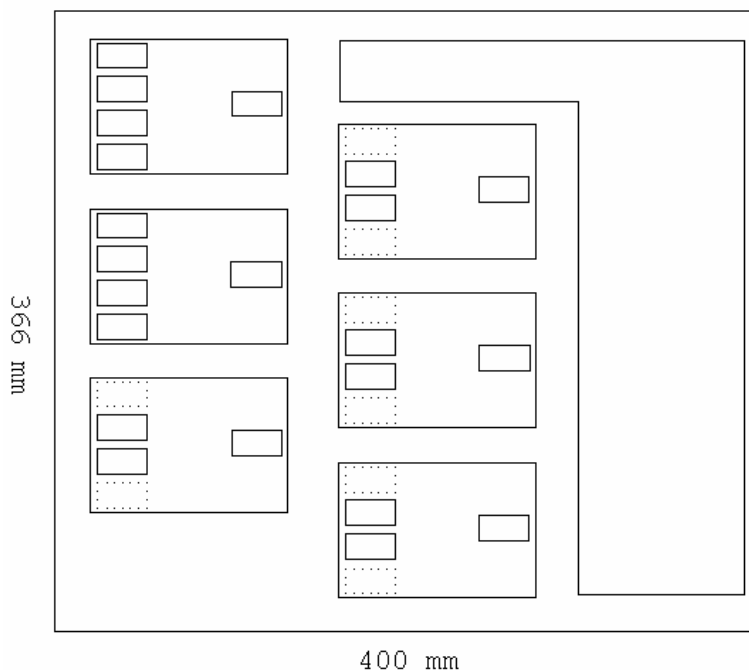
Signaalinmonistin rakennetaan siten, että yhdelle nelikerroksiselle piirikortille sijoitetaan useita kappaleita kahdesta kahdeksaan –tyyppisiä moduuleja. Yhdessä moduulissa on aina kaksi yhdestä neljään –tyyppistä monistinta. Yhdestä kahteen –tyyppiset monistimet voidaan toteuttaa yksinkertaisesti jättämällä moduulin reunimmaisiet lähettimet latomatta. Näin menettelemällä on tarpeen suunnitella vain yhdenlainen moduuli. Moduuleihin tuodaan aina kaksi optista signaalia ja niistä kumpikin monistetaan ON Semiconductor -yhtiön MC100EP14DT puskuripiirin avulla kahdelle tai neljälle lähettimelle eteenpäin siirrettäväksi.

3.3.1 Signaalinmonistimen toiminta ja rakenne

Signaalinmonistimen suunnittelussa hyödynnetään testauslaitteesta saatuja kokemuksia. Komponentteina käytetään soveltuvien osien samoja kuin testauslaitteessa. Vastaanottimina toimivat Honeywellin HFD3180-102 pin-fotodiodit, joiden vastaanottamaa signaalia vahvistavat Maximin MAX3269–vahvistimet. Vahvistimilta signaali johdetaan ON Semiconductor -yhtiön MC100EP14DT puskuripiireille /15/, jotka monistavat niille tuotavan vahvistetun differentiaalisen signaalin maksimissaan viiteen eri linjaan. Näiltä piireiltä signaali johdetaan MAX3996-laserohjaimille ja niiltä edelleen HFE4190-541 -laserdiodeille samoin kuin testauslaitteessa. Jokaisen aktiivikomponentin välittömään läheisyyteen sijoitetaan lisäksi pieniä 10 nF kondensaattoreita varmistamaan virransaanti komponenttien ottaessa virtaa jaksottaisesti. Kondensaattorit estävät käyttöjännitteen notkahtelun kuormituksen vaihdellessa.

Signaalinmonistimet kootaan 366 mm x 400 mm kokoisille piirikorteille, joihin jokaiseen asennetaan neljä kappaletta yhdestä neljään -tyyppisiä ja kahdeksan kappaletta yhdestä kahteen -tyyppisiä monistimia. Laitteen etureunaan asetetaan valodiodit, jotka ilmaisevat kunkin kanavan toiminnan. Valodiodi loistaa, kun vastaanotin ottaa vastaan sopivaa dataa. Piirikortille asennetaan testaus- ja käyttöönotto-työn helpottamiseksi

lisäksi valodiodit jokaisen laserdiodin läheisyyteen ilmaisemaan niiden toiminta. Laitteen piirikaavio on esitetty liitteessä II.



Kuva 20. Laitteen modulaarinen rakenne selviää kuvasta. Jokaiselle 400 mm x 366 mm kokoiselle piirikortille sijoitetaan neljä kappaletta yhdestä neljään -tyyppisiä ja kahdeksan kappaletta yhdestä kahteen -tyyppisiä monistimia. Jokaisessa moduulissa on kaksi erillistä tuloa ja kaksi tai neljä lähtöä kummallekin tulevalle signaalille. Moduulit on asennettu hieman limittäin, jotta valokuidut voidaan viedä moduulien väleistä. Signaalit tulevat moduuleihin oikealta, lähettimet ovat vasemmalla puolella. Kortin oikeassa reunassa on moduuleille tehoa syöttävä ”step-down”-tyyppinen hakkuriteholähde.

Koska signaalinmonistimen komponentit toimivat 3.3 V jännitteellä ja asennuskohteessa on saatavilla ainoastaan 5 V ja 12 V positiiviset jännitteet, on piirikortille asennettava myös sopiva teholähde. Teholähteessä käytetään Maximin MAX1962- ja National Semiconductor -yhtiön LM2679-hakkuriohjaimia, ja se suunnitellaan laitteiston tehonkulutuksen perusteella. Mittausten perusteella yksi kahdesta kahdeksaan -tyyppinen signaalinmonistinmoduuli kuluttaa tehoa noin 4.8 W. Koko piirikortin tehonkulutus voidaan laskea kertomalla yhden moduulin kuluttama teho moduulien lukumäärällä. Näin menetellen saadaan kokonaisen piirikortin tehonkulutukseksi 28.8 W. Todellisuudessa tehonkulutus on hieman pienempi, sillä kaksi kolmasosaa laitteen

moduuleista on pienempiä, kahdesta neljään –tyyppisiä. Teholähteeseen jää näin ollen hieman käyttämätöntä kapasiteettia.

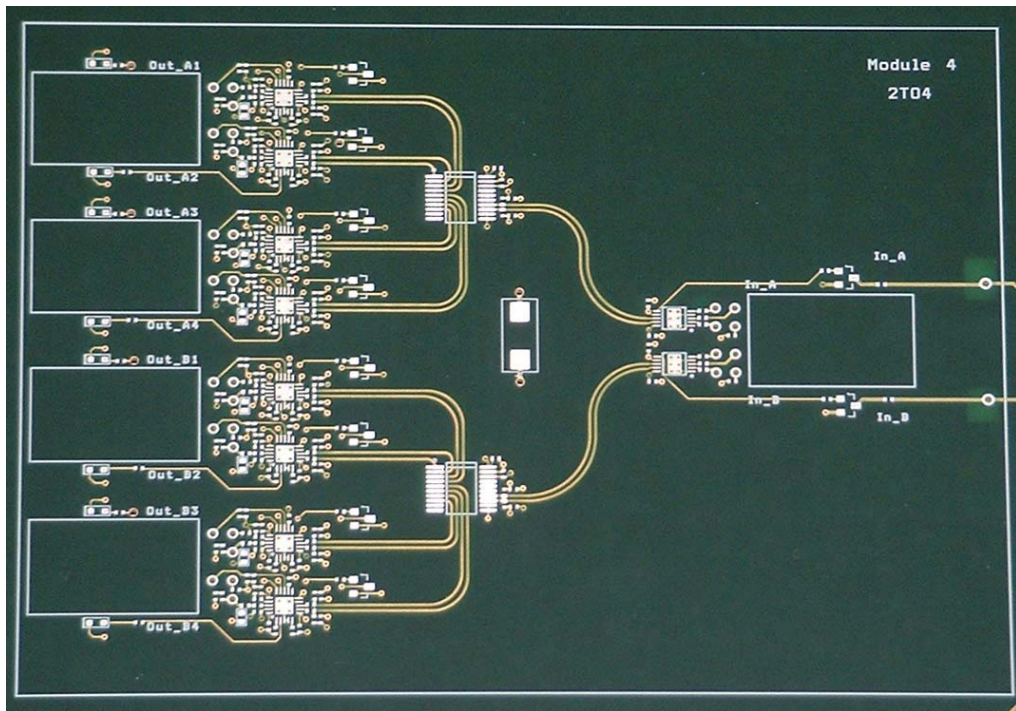
Teholähteen ylimitoitus ja laitteiston modulaarinen rakenne mahdollistavat kuitenkin myös kuuden kahdesta kahdeksaan –tyyppisen moduulin asennuksen piirikortille, mikäli tällaiselle rakenteelle ilmaantuu käyttöä.

3.3.2 Signaalinmonistimen layout

Signaalinmonistimen layoutissa käytetään testauslaitteessa käytettyjä ja testattuja ratkaisuja hieman edelleen kehitettyinä. Testauslaitteeseen verrattuna komponentit sijoitetaan lähemmäs toisiaan ja kaikki signaalinmonistinmoduulien vastukset ja kondensaattorit pienennetään kokoon 0402, mikä tarkoittaa sitä, että niiden pituus on 0.04 tuumaa ja leveys 0.02 tuumaa. Eurooppalaisille tutummissa yksiköissä komponenttien mitat ovat noin 1 mm ja 0.5 mm. Lisäksi kaikki komponentit sijoitetaan piirilevyn ylimpään kerrokseen, mikä helpottaa huomattavasti kokoonpanoa.

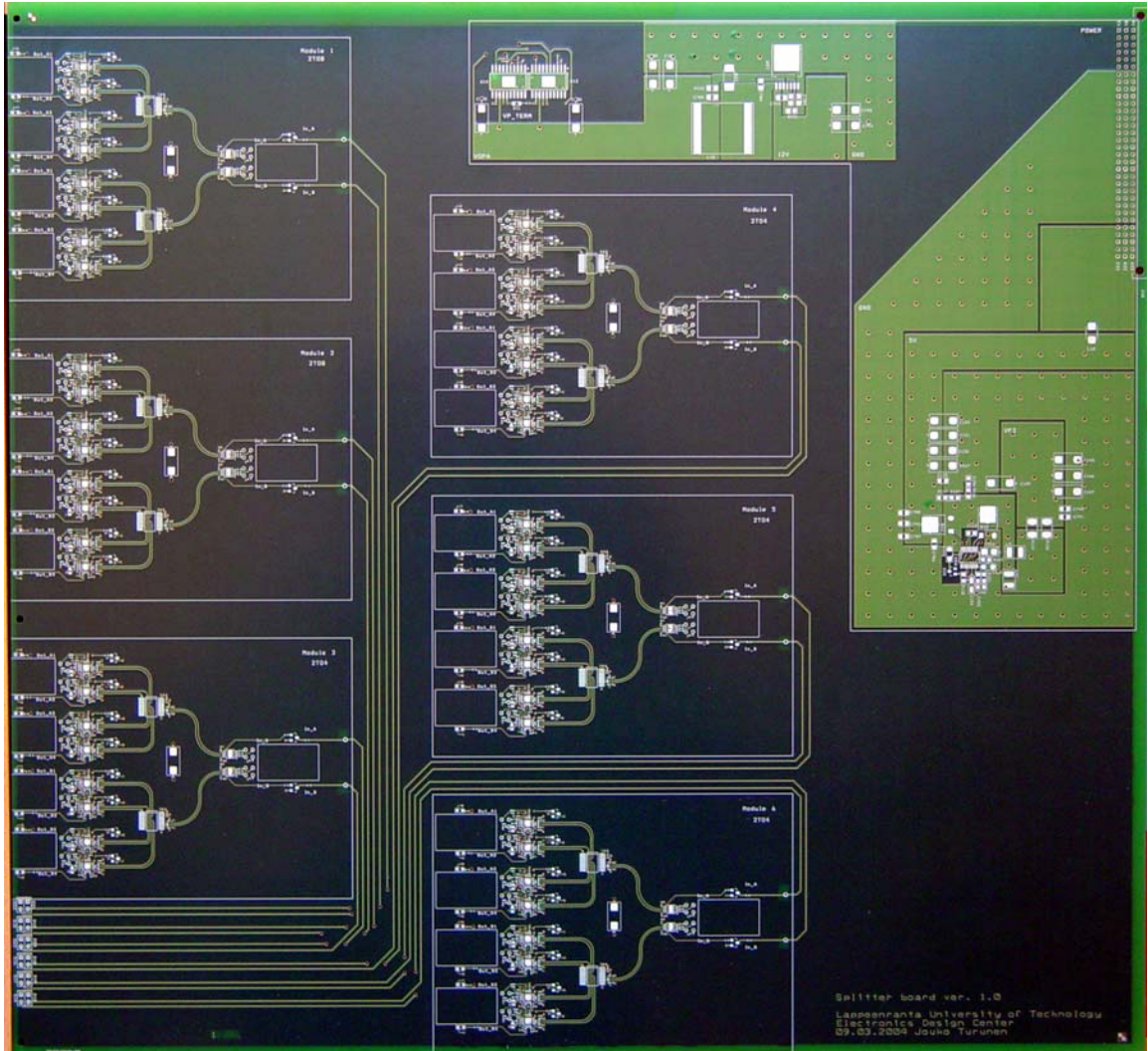
Signaalinmonistimessa nopeita signaaleja joudutaan monimutkaisemman rakenteen vuoksi siirtämään piirilevyllä huomattavasti pidempiä matkoja kuin testauslaitteessa. Kaikki siirtolinjoissa olevat mutkat pyöristetään heijastusten välttämiseksi ja piirilevyvetojen leveydet mitoitetaan jälleen kaavan (10) avulla. 50Ω ominaisimpedanssi saavutetaan 0.4 mm johdinleveydellä.

Nopeat siirtotiet päätetään jälleen 50Ω terminointivastuksilla. Jotta terminointivastuksissa kuluva teho saadaan pienennettyä, muodostetaan terminointivastuksille sopiva 1.24 V jännitetaso operaatiovahvistimen OPA569AIDWP:n avulla kuten testauslaitteessa.



Kuva 21. Yksi signaalinmonistinkortin kahdesta kahdeksaan –tyyppinen moduuli yläpuolelta kuvattuna. Nopeat signaalitiet on sovitettu tarkasti ja niissä olevat kulmat on pyöristetty.

Teholähdeosiossa tavalliset kapeat piirilevyvedot on korvattu leveämmillä kuparialueilla. Tällaisessa rakenteessa voidaan kuljettaa useiden ampeerien virtoja ja samalla saadaan pienennettyä johtimien induktanssia.



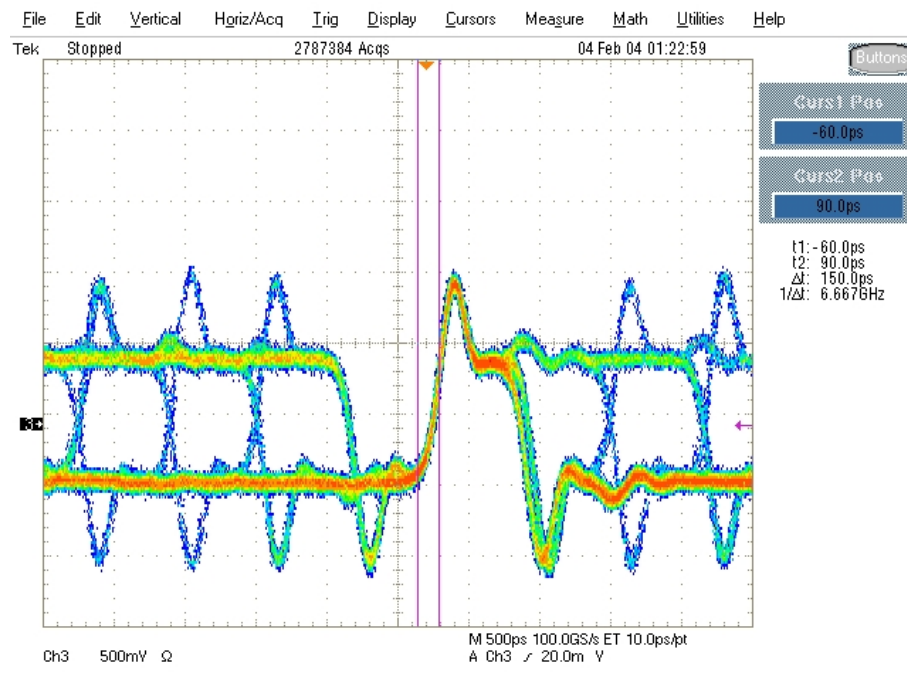
Kuva 22. 400 mm x 366 mm kokoinen piirikortti, jossa on kaksi kappaletta kahdesta kahdeksaan –tyyppisiä ja neljä kappaletta kahdesta neljään –tyyppisiä monistinmoduuleja sekä moduuleille tehoa syöttävä hakkuriteholähde. Teholähdeosiossa tavanomaiset kapeat piirilevyvedot on korvattu leveillä kuparialueilla. Näin minimoidaan johtimien induktanssi ja voidaan kuljettaa useiden ampeerien suuruisia virtoja.

4 MITTAUKSET

4.1 Testauslaitteen mittaustulokset

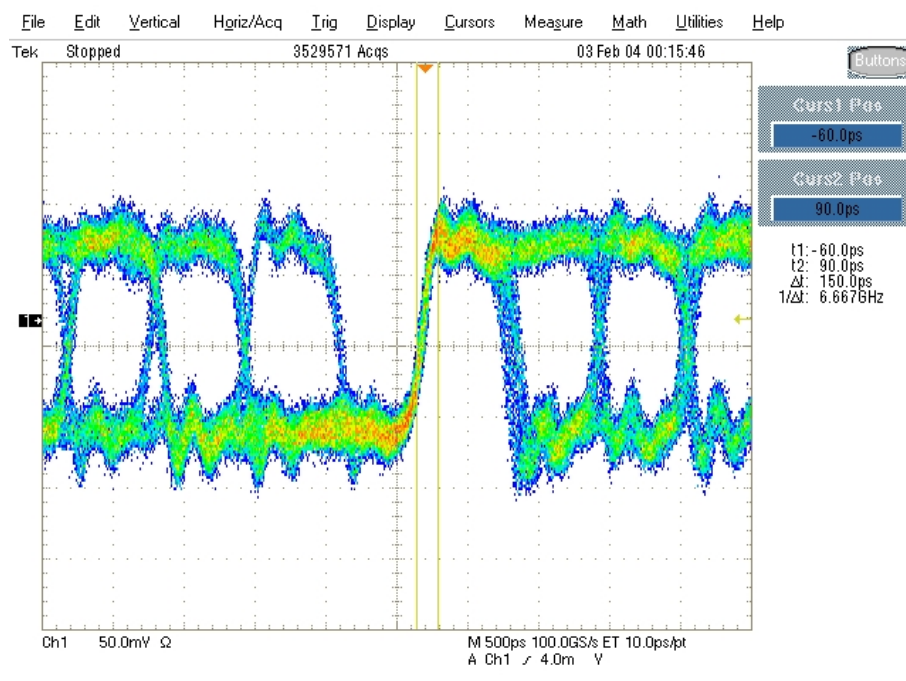
Jotta signaalinmonistimen toiminta saadaan luotettavasti testattua, tulee ensin varmistaa ettei testauslaite itse aiheuta bittivirheitä. Tämä voidaan tarkistaa asettamalla testauslaite lähettämään satunnaista dataa 90 m pituiseen optiseen kuituun, vastaanottamalla tämä signaali kuidun toisesta päästä ja tutkimalla syntyneiden virheiden lukumäärää. Virheiden määrän tulee jäädä selvästi alle signaalinmonistimelle sallittujen virheiden määrän.

Tutkitaan aluksi TLK2501:ltä laserohjaimelle lähtevää signaalia. Mittalaitteena käytetään Tektronix TDS 7404 -oskilloskooppia ja differentiaalianturia. Signaalin nousuvassa reunassa näkyy varsin paljon ylitystä, joka aiheutuu siirtotiessä olevien impedanssin epäjatkuvuuskohtien aiheuttamista heijastuksista. Bittivirheitä ei kuitenkaan ilmaannu 10000 s mittausaikana, joten muutoksia laitteeseen ei ole välttämätöntä tehdä. Signaalinmonistimen suunnittelussa testauslaitteesta saadut havainnot kuitenkin huomioidaan ja impedanssisovitusta pyritään parantamaan.



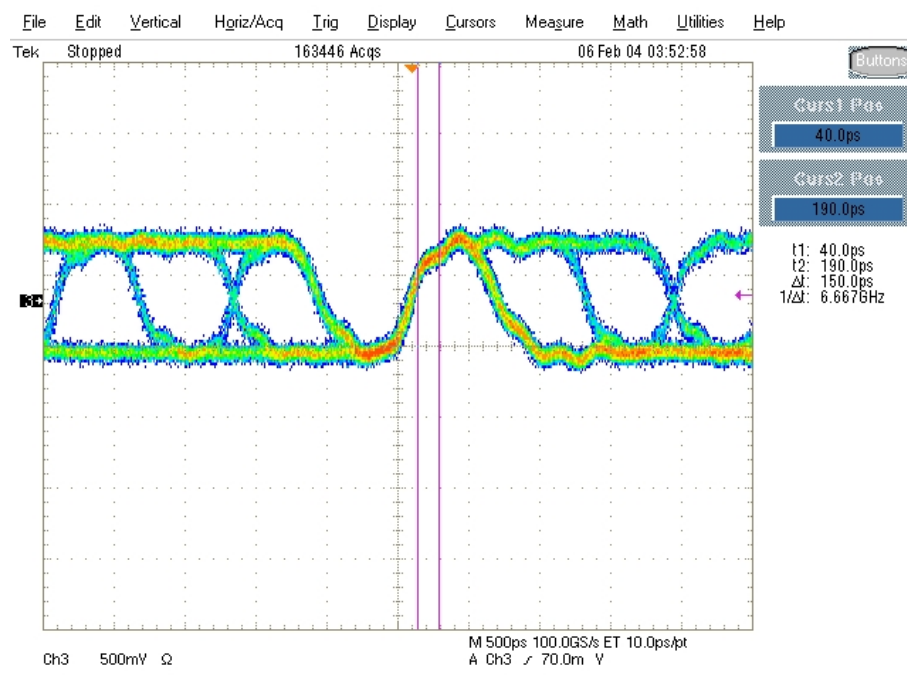
Kuva 23. Signaali mitattuna MAX3996:n tulosta. Pulssin nousevissa reunoissa havaitaan ylitystä, joka aiheutuu signaalin heijastumisesta impedanssin epäjatkuvuuskohdista. Testauslaite toimii kuitenkin heijastuksista huolimatta ongelmitta, joten muutoksia ei tässä tapauksessa tarvitse tehdä.

MAX3996-laserohjaimelta laserdiodeille lähtevä signaali on jo hieman paremman näköinen, signaalin nousevissa reunoissa esiintyneet korkeat huiput ovat selvästi vaimentuneet, eikä signaalissa enää juurikaan näy ylitystä.



Kuva 24. Signaali mitattuna laseriodin jaloista. Havaitaan, että MAX3996:n tulossa esiintyvät korkeat huiput signaalin nousevissa reunoissa ovat nyt vaimentuneet huomattavasti.

Kuvassa (25) nähdään 90 metrin pituisesta valokuitulenkestä palaava signaali mitattuna MAX3269–vahvistinpiirin lähdöstä.



Kuva 25. Signaali mitattuna MAX3269:n lähdöstä. Havaitaan, että signaali vääristyy hieman kulkiessaan 90 m matkan optisessa kuidussa

Signaalin tunnistus on sitä helpompaa, mitä suurempi neliö pulssien väliselle alueelle pystytään piirtämään. Jos verrataan kuvia (23) ja (25) toisiinsa, havaitaan että signaali on hieman vääristynyt kuljettuaan 90 metrin matkan optisessa kuidussa ja suurimman piirrettävissä olevan neliön koko on hieman pienentynyt.

Virhekerroin lasketaan mittaustulosten perusteella. 10000 s mittausaikana ei ilmaannu bittivirheitä. Koska siirtonopeus on 1600 Mbit/s, on testauslaitteen virhekerroin, BER-luku, kaavan (11) mukaisesti parempi kuin 10^{-13} . Tämä on selvästi parempi kuin signaalinmonistimelle sallittu 10^{-12} , joten laitetta voidaan luotettavasti käyttää signaalinmonistimen kehitystyössä.

Tutkitaan vielä, toimiiko testauslaite myös tarvittavaa suuremmilla nopeuksilla. Näin saadaan kuva siitä, toimitaanko aivan laitteen ääri rajoilla. Kasvattamalla ulkoinen kellotaajuus sataan megahertsiin, siirtonopeudeksi tulee 2000 Mbit/s. Tälläkään nopeudella bittivirheitä ei tule 10000 s mittausaikana. Laitetta voitaisiin siis käyttää luotettavasti myös näin suurella nopeudella. Varsinaista ylärajataajuutta laitteen toiminnalle ei testeissä löydetä, sillä taajuuden kasvattaminen yli sadan megahertsin ei

käytössä olevalla signaaligeneraattorilla onnistu. Laitteen virheetön toiminta 25% tarvittavaa suuremmalla nopeudella antaa kuitenkin hyvän kuvan laitteen luotettavuudesta.

Lämpötilakompensoinnin toiminnan tutkimiseksi testauslaitetta käytetään eri lämpötiloissa tarkkaillen laseriodin bias- ja modulointivirtaa sekä bittivirheiden lukumäärää. Testauslaitetta käytetään ainoastaan huoneenlämmössä laboratoriotiloissa, mutta koska signaalinmonistimen rakenne on samankaltainen kuin testauslaitteen rakenne, voidaan saatuja tuloksia hyödyntää myös signaalinmonistimen suunnittelussa.

Taulukko 1. Bittivirheiden lukumäärä sekä bias- ja modulointivirrat lämpötilan funktiona.

Lämpötila [°C]	I_{MOD} [mA]	I_{BIAS} [mA]	Bittivirheiden lkm. (10000 s)
0	4.8	7.1	0
20	5.6	6.8	0
40	6.4	6.2	0

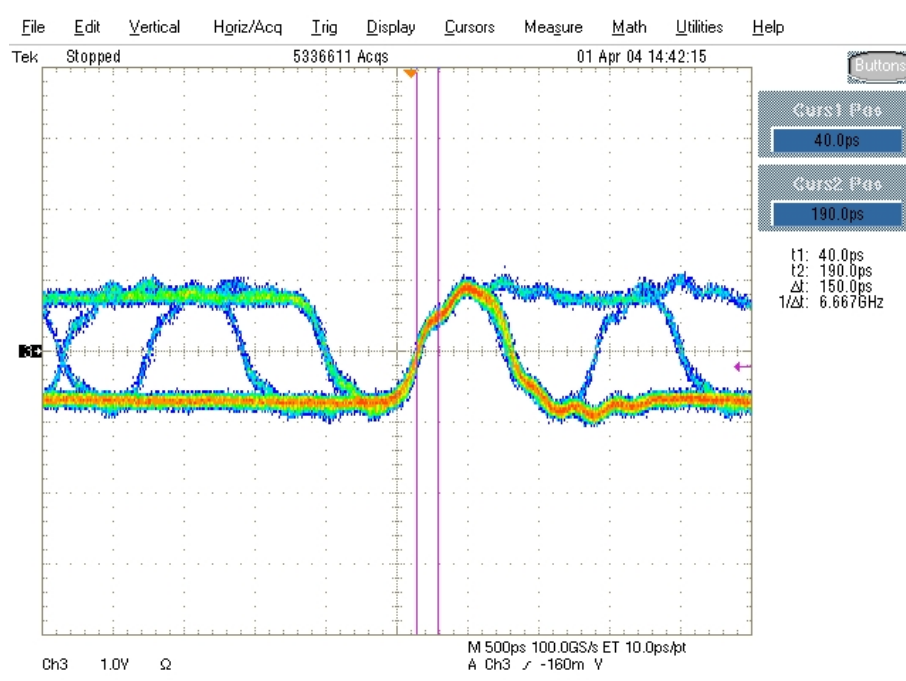
Testaustuloksista nähdään, että laite toimii valituilla komponenteilla ja asetuksilla luotettavasti lämpötila-alueella 0..40 °C nopeudella 1.6 Gbit/s.

4.2 Signaalinmonistimen mittaustulokset

Koska laite koostuu keskenään identtisistä moduuleista, ei tässä ole tarpeen testata kaikkia suuren piirilevyn monistimia vaan voidaan keskittyä vain yhden moduulin tutkimiseen. Tämä vähentää huomattavasti testaustyötä.

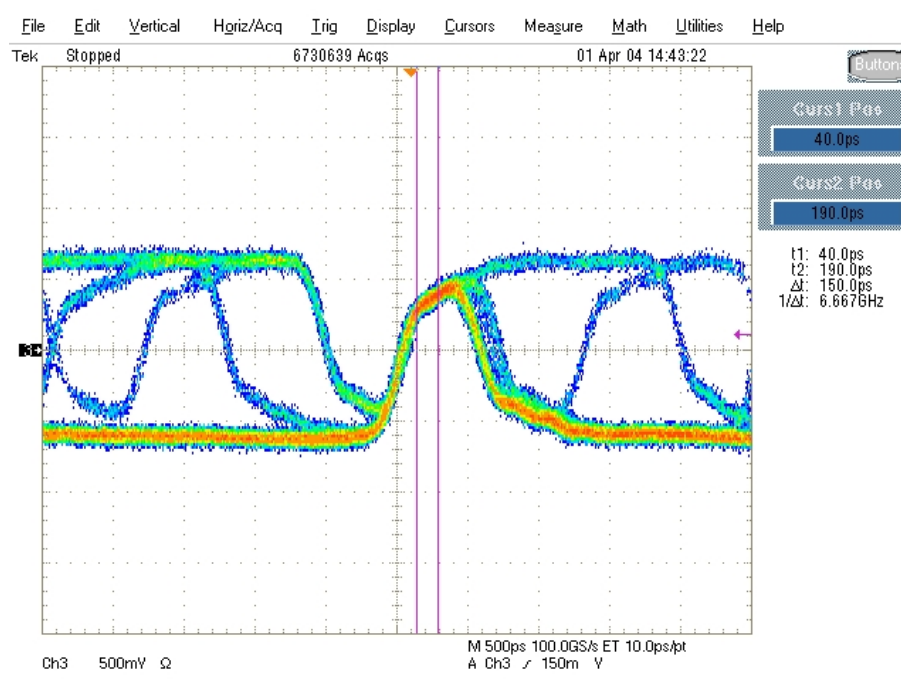
Mittaukset suoritetaan kytkemällä signaalinmonistin aiemmin valmistettuun testauslaitteeseen 90 metrin pituisen optisen kuidun avulla. Kuitu kytketään signaalinmonistinmoduulin toiseen tuloon. Signaalinmonistimen yhdestä lähdöstä testauslaitteen 1.6 gigabitin sekuntinopeudella generoima satunnainen informaatio lähetetään 90 metrin pituisia kuitua pitkin takaisin testauslaitteeseen.

Tutkitaan aluksi testauslaitteelta monistimeen saapuvan signaalin laatua. Mittalaitteena on jälleen Tektronix TDS 7404 –oskilloskooppi ja differentiaalianturi. Oskilloskooppikuva puskuripiirin tulosta osoittaa impedanssisovituksen parantuneen selvästi testauslaitteeseen verrattuna. Korkeita huippuja, kuten kuvassa (23), ei esiinny.



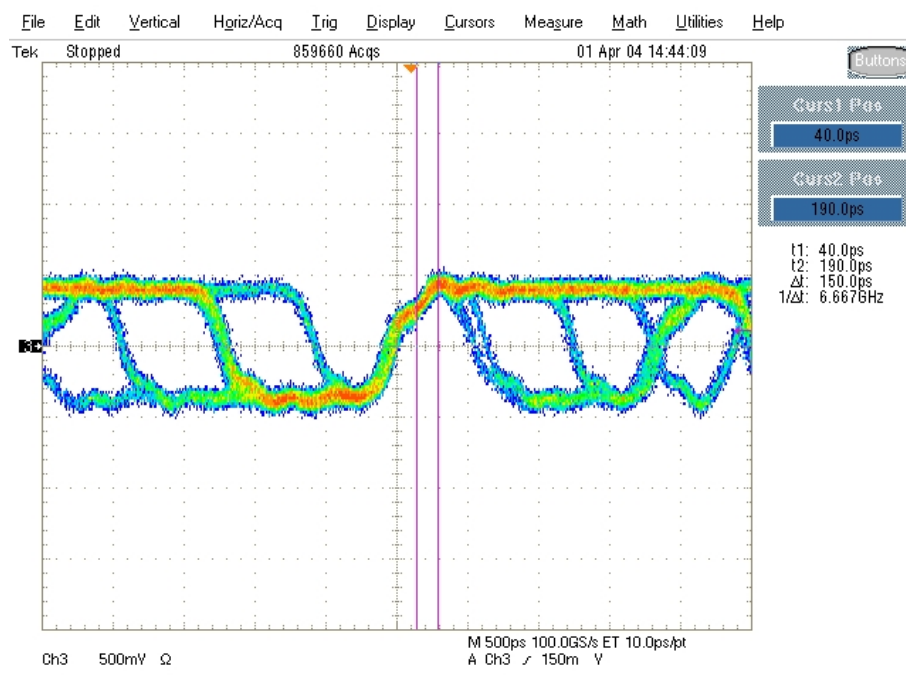
Kuva 26. Testauslaitteelta saapuva signaali mitattuna signaalinmonistinkortin MC100EP14-puskuripiirin tulosta. Havaitaan, että impedanssisovitus on varsin onnistunut, kuvan (23) kaltaisia korkeita huippuja ei signaalissa esiinny.

Tutkittaessa signaalin laatua monistinkortilla olevan laserohjaimen tulosta, havaitaan signaalin nousevissa reunoissa alitusta. Tämä aiheutuu siitä, että puskuripiirin ja laserohjaimen välillä signaalitiellä on varsin jyrkkä 180 asteen mutka komponenttien pinnijärjestyksestä johtuen.



Kuva 27. Signaali mitattuna MAX3996:n tulosta. Kuvasta havaitaan selvästi hieman alitusta signaalin nousevissa reunoissa. Tämä johtuu varsin jyrkästä mutkasta signaalitiellä. Signaali on kuitenkin hyvin tunnistettavissa.

Tutkitaan nyt, miltä signaali näyttää saapuessaan takaisin testuslaitteelle. Tällöin signaali on kulkenut yhteensä 180 metrin matkan ja se on monistettu yhden kerran.



Kuva 28. Takaisin testauslaitteeseen saapuva signaali mitattuna testauslaitteen vastaanotinpiirin lähdöstä. Havaitaan, että signaalin laatu ei ole merkittävästi heikentynyt monistuksen johdosta.

Kun verrataan kuvia (25) ja (28) toisiinsa, nähdään, ettei monistin merkittävästi heikennä signaalin laatua.

Bittivirheiden lukumäärää mitataan testauslaitteen avulla 20 °C lämpötilassa. Laite vertaa lähetettyä ja vastaanotettua signaalia toisiinsa ja ilmoittaa mahdollisista bittivirheistä. 10000 sekunnin mittausaikana ei ilmaannu bittivirheitä käytettäessä laitteistoa 1600 Mbit/s nopeudella. Virhekerroin voidaan jälleen laskea saatujen tulosten ja kaavan (11) avulla. Virhekertoimeksi saadaan parempi kuin 10^{-13} .

Nostetaan vielä nopeus arvoon 2000 Mbit/s ja tutkitaan bittivirheiden määrää tällä nopeudella. 10000 sekunnin aikana ilmaantuu 150 kappaletta virheitä. Pienentämällä nopeus arvoon 1960 Mbit/s, ei virheitä enää mittausaikana ilmaannu. Tämä on siis laitteen suurin käyttökelpoinen nopeus sallitulla virhekertoimella.

Mittaustulosten perusteella laitteisto toimii luotettavasti 22.5 % vaadittua suuremmalla nopeudella. Näin ollen laitteiston voidaan olettaa toimivan 1.6 Gbit/s nopeudella luotettavasti myös komponenttien ikääntyessä.

5 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli kehittää CERN:in (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) Compact Muon Solenoid –nimiseen hiukkastutkimusasemaan laite, joka monistaa useita laitteeseen tuotavia optisia 1.6 GHz signaaleja joko kahdeksi tai neljäksi lähteväksi optiseksi signaaliksi aiheuttamatta muutoksia siirrettävään informaatioon. Laitteiston luotettavuudelle asetetaan suuria vaatimuksia, sillä kyseessä on tieteelliseen tutkimukseen käytettävän mittauslaitteiston osa. Lisäksi laitteiston suunniteltu käyttöikä on yli 10 vuotta, mikä on otettava huomioon komponenttien valinnassa. Esimerkiksi tehollähteessä ei voida käyttää elektrolyyttikondensattoreita, sillä niiden käyttöikä ei ole riittävän pitkä.

Diplomityön aluksi suunniteltiin testauslaite, jonka avulla tutkittiin erilaisten komponenttien toimivuutta ja haettiin optimaalisia komponenttiarvoja ja asetuksia. Testauslaite sisältää yhden optisen lähettimen ja vastaanottimen, joita käytetään perusrakenteeltaan samanlaisina myös signaalinmonistimessa.

Seuraavaksi suunniteltiin testauslaitteesta saatujen kokemusten perusteella signaalinmonistinmoduuli, jossa on kaksi tuloa ja neljä lähtöä. Tämän moduulin toimintaa tutkittiin työn alussa suunnitellun testauslaitteen avulla.

Lopuksi suunniteltiin signaalinmonistinkortti, joka sisältää kuusi itsenäistä monistinmoduulia ja noin 30 W tehoisen hakkuritehollähteen.

Gigahertsien taajuuksilla toimittaessa impedanssisovitus osoittautui erittäin tärkeäksi. Sovitus ei testauslaitteessa onnistunut aivan täydellisesti. Monistimen suunnittelussa asiaan kiinnitettiin enemmän huomiota ja tulokset olivatkin selvästi parempia.

Laitteistolle sallituksi virhekertoimeksi oli asetettu 10^{-12} , eli laitteisto saa aiheuttaa korkeintaan yhden bittivirheen siirrettyä terabittiä kohti. Mittaustulosten perusteella virhekertoimeksi saatiin parempi kuin 10^{-13} jopa 1.96 GHz nopeudella, joten laitteisto täyttää kirkkaasti sille asetetut vaatimukset.

6 KIRJALLISUUSVIITTEET

- /1/ Tuominiemi, Jorma. Katsaus CERNin tulevaisuudennäkymiin, luento 3.10.2000. CERN, Geneve, Sveitsi. Materiaali saatavissa osoitteesta <http://webcast.cern.ch/Projects/WebUniversity/Misc/Tuominiemi/> [Viitattu 07.11.2003]

- /2/ Cittolin, Sergio. Compact Muon Solenoid Experiment. 2003. 48 s. Saatavissa osoitteesta <http://cmsinfo.cern.ch/Brochures/IntroToCMS.pdf> [Viitattu 07.11.2003]

- /3/ Haykin, Simon. Communication Systems, 3rd edition. New Baskerville, USA: John Wiley & Sons Inc 1994. 872 s. ISBN 0-471-57176-8.

- /4/ Kasap, Safa. Optoelectronics and Photonics – Principles and Practices. New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc 2001. 340 s. ISBN 0-201-61087-6.

- /5/ Agilent Technologies Inc. Fiber Optic Technical Training Manual. 2000. 64 s. Saatavissa osoitteesta <http://literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-5117E.pdf> [Viitattu 11.11.2003]

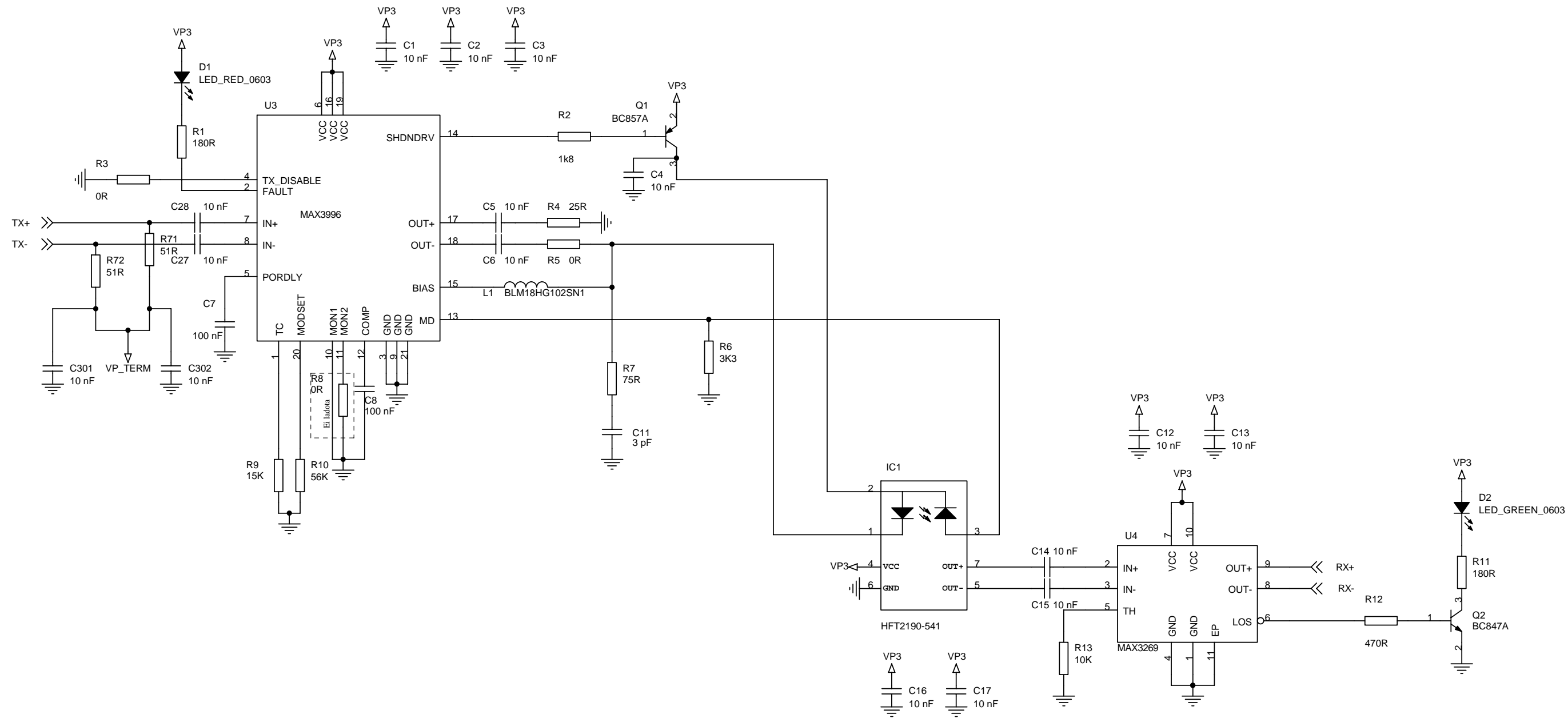
- /6/ Ramaswami, Rajiv. Optical Networks: A Practical Perspective. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc 1998. 632 s. ISBN 1-55860-445-6.

- /7/ Maxim Integrated Products. Jitter in Digital Communication Systems, Part 1. 2001. 7 s. Saatavissa osoitteesta <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/5hfan403.pdf> [Viitattu 17.11.2003]

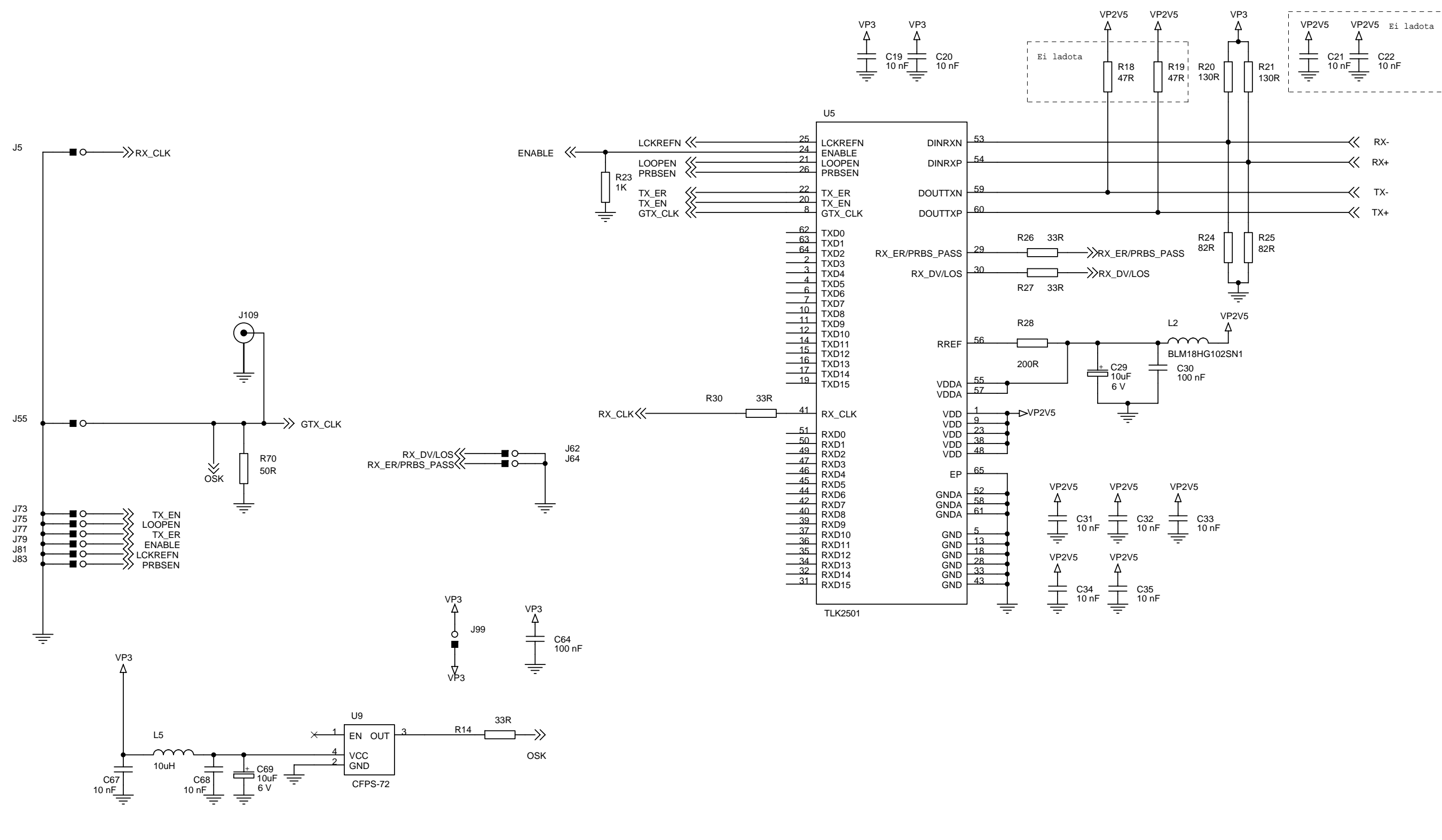
- /8/ Johnson, Howard, Graham, Martin. High Speed Digital Design : A Handbook of Black Magic. New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc 1993. 447s. ISBN 0-13-395724-1.

- /9/ Miller, Gary. Modern Electronic Communication. New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc 2002. 883 s. ISBN 0-13-016762-2.
- /10/ Texas Instruments Inc. TLK2501 1.5 to 2.5 Gbps Transceiver Data Sheet, 2000. Saatavissa osoitteesta <http://www-s.ti.com/sc/ds/tlk2501.pdf>
[Viitattu 15.12.2003]
- /11/ Maxim Semiconductor. MAX3996 Data Sheet, rev. 1. 2002, 16 s. Saatavissa osoitteesta <https://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX3996.pdf>
[Viitattu 15.12.2003]
- /12/ Honeywell International Inc. Fiber Optic LAN Components – HFE4190-541 Data Sheet. 2003, 5 s. Saatavissa osoitteesta <http://content.honeywell.com/vcsel/pdf/HFT419x-541.pdf> [Viitattu 15.12.2003]
- /13/ Maxim Semiconductor. MAX3269 Data Sheet, rev. 4. 2001, 14 s. Saatavissa osoitteesta <https://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/MAX3264-MAX3765.pdf>
[Viitattu 15.12.2003]
- /14/ Honeywell International Inc. Fiber Optic LAN Components – HFD3180-102 Data Sheet 2003. 5 s. Saatavissa osoitteesta <http://content.honeywell.com/vcsel/pdf/hfd3180-102.pdf> [Viitattu 15.12.2003]
- /15/ ON Semiconductor. MC100EP14 Data Sheet, rev. 2. 2001. 8 s. Saatavissa osoitteesta www.onsemi.com/pub/Collateral/MC100EP14-D.PDF
[Viitattu 15.12.2003]

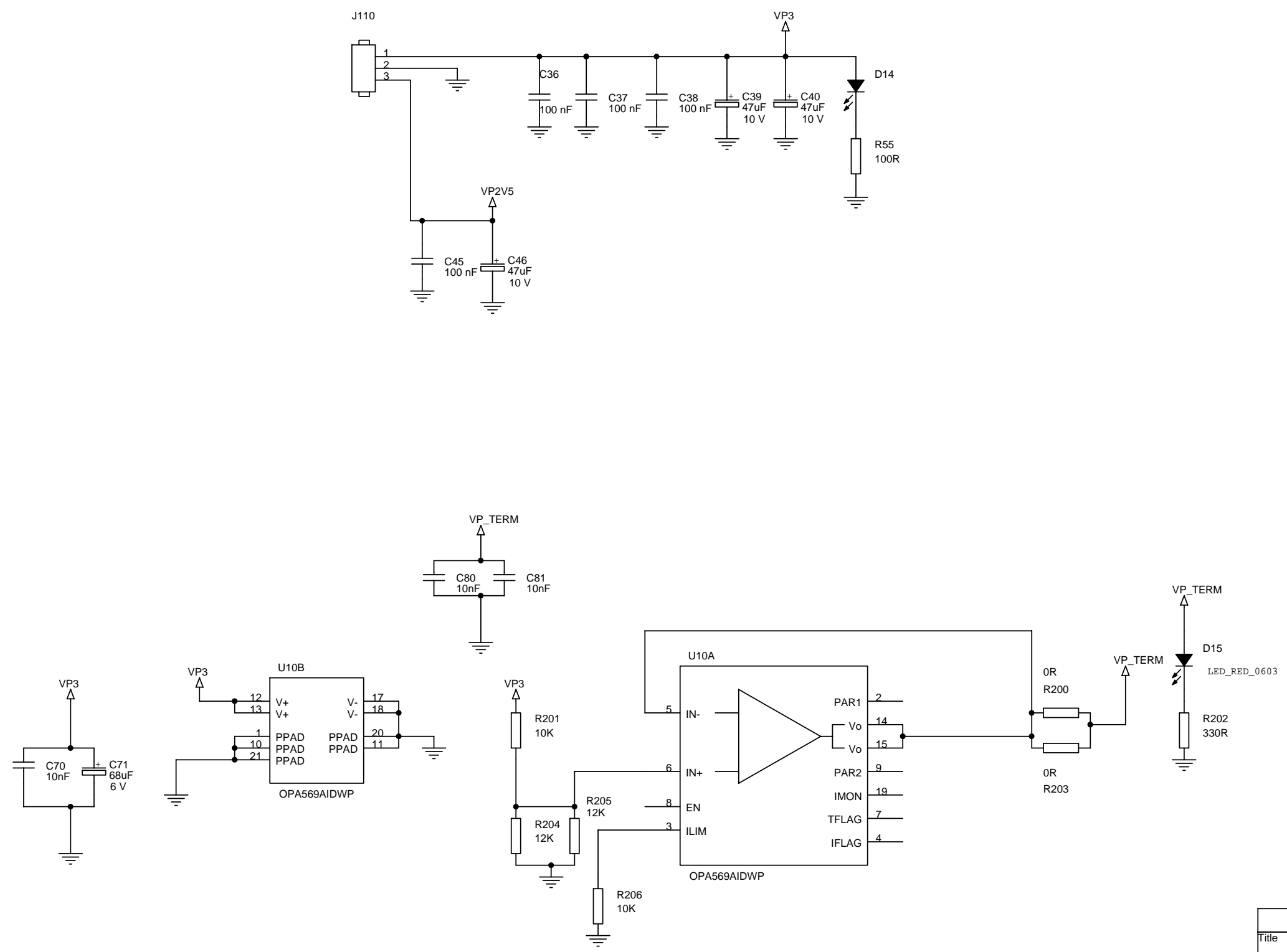
Liite I: Testauslaitteen piirikaavio



Title		
BER-tester, version 2 - optics		
Size	Document Number	Rev
A3	<Doc>	
Date:	Monday, April 19, 2004	Sheet 1 of 3

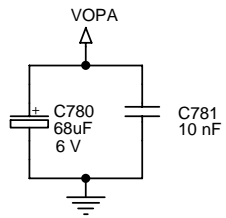
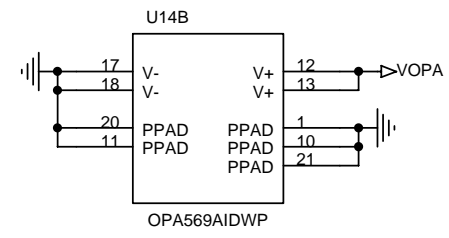
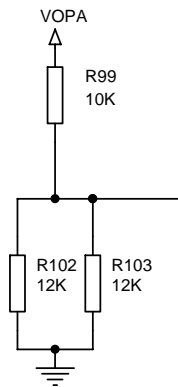
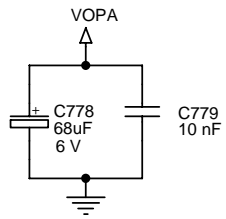
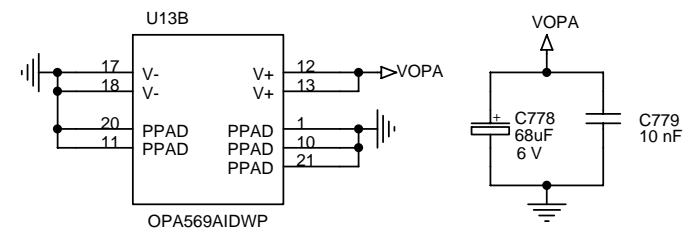


Title		
BER-tester, version 2 - TLK		
Size	Document Number	Rev
A3	<Doc>	
Date:	Monday, April 19, 2004	Sheet 2 of 3

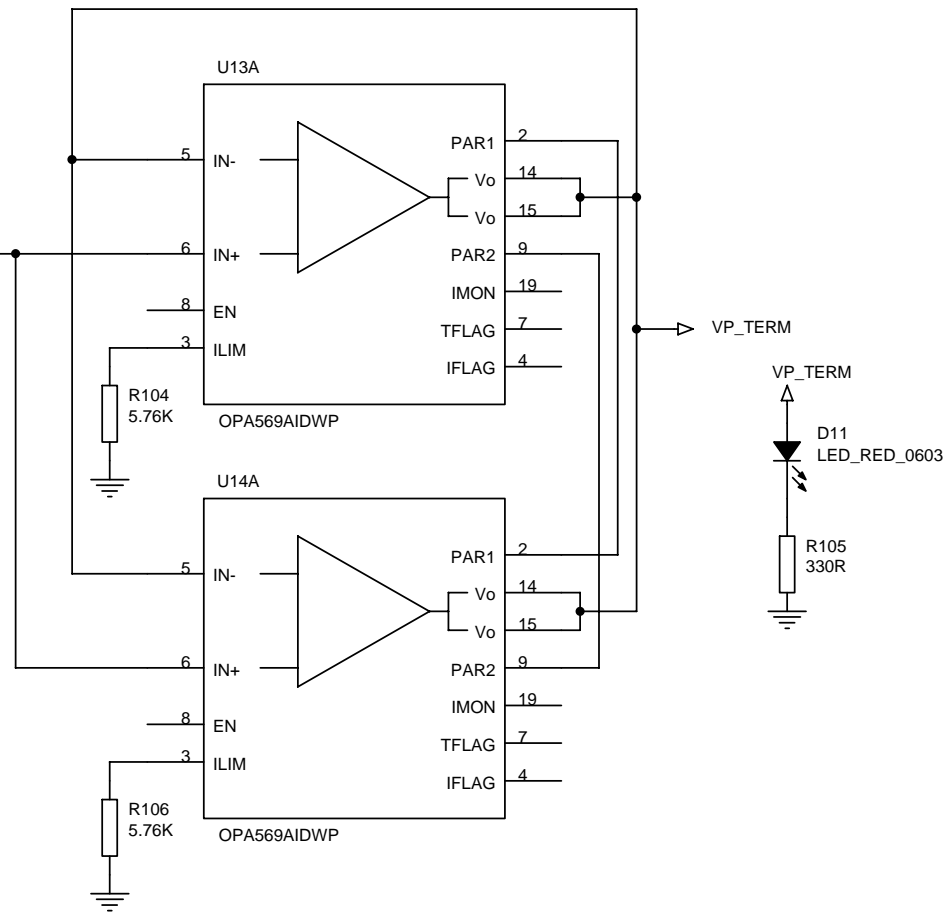


Title		
BER-tester, version 2 - power		
Size	Document Number	Rev
A3	<Doc>	
Date:	Monday, April 19, 2004	Sheet 3 of 3

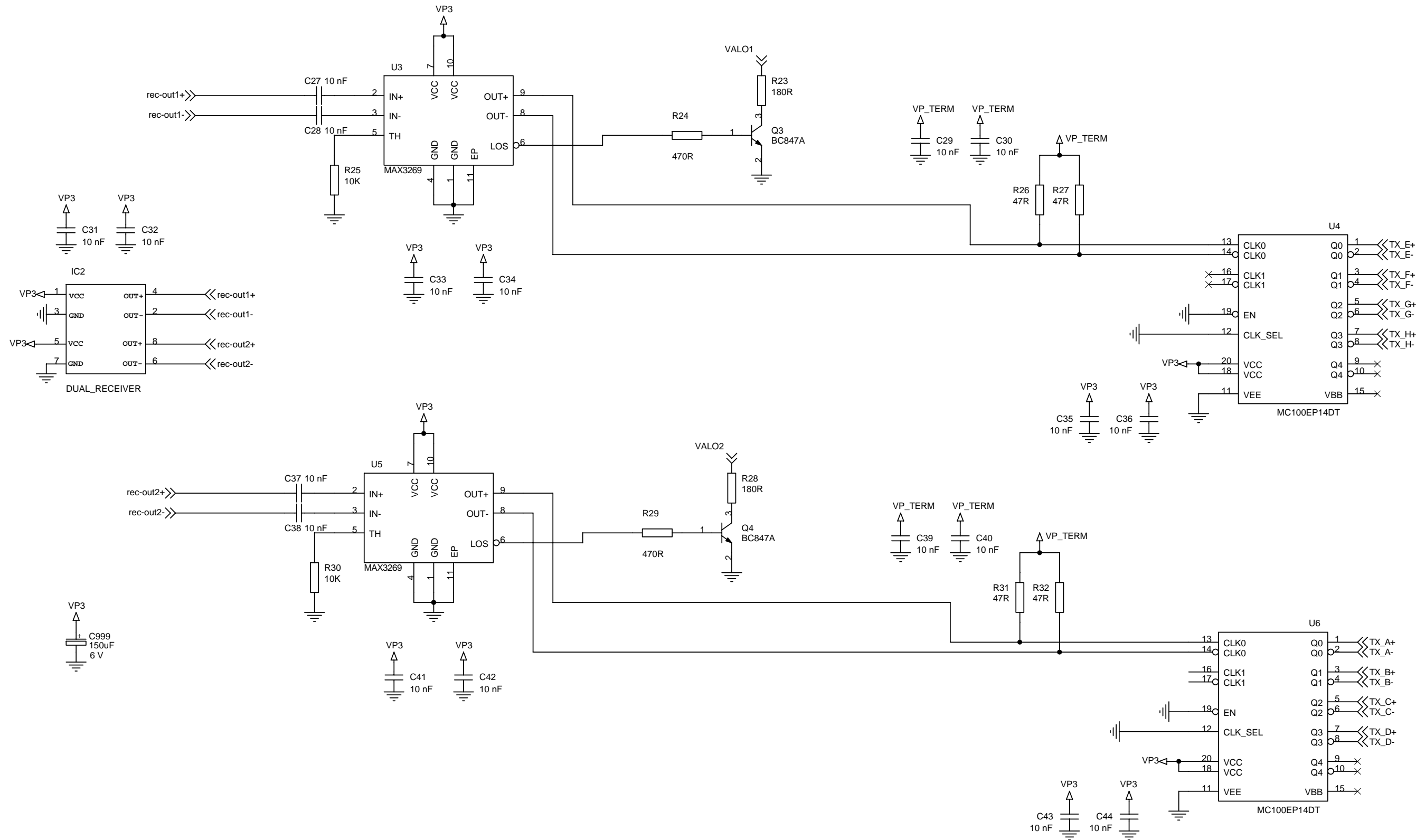
Liite II: Signaalinmonistimen piirikaavio



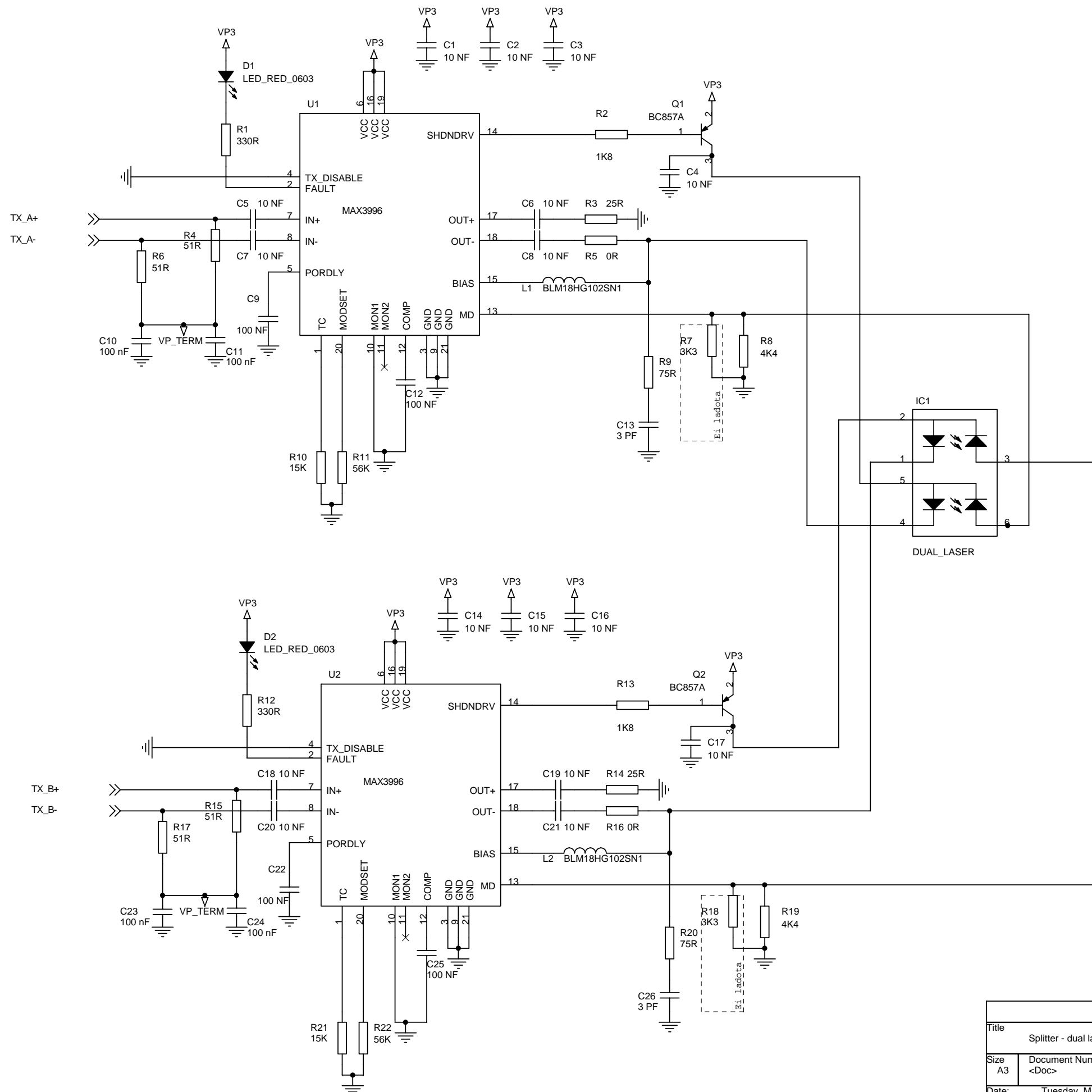
jännitejako -> 1.2374 V



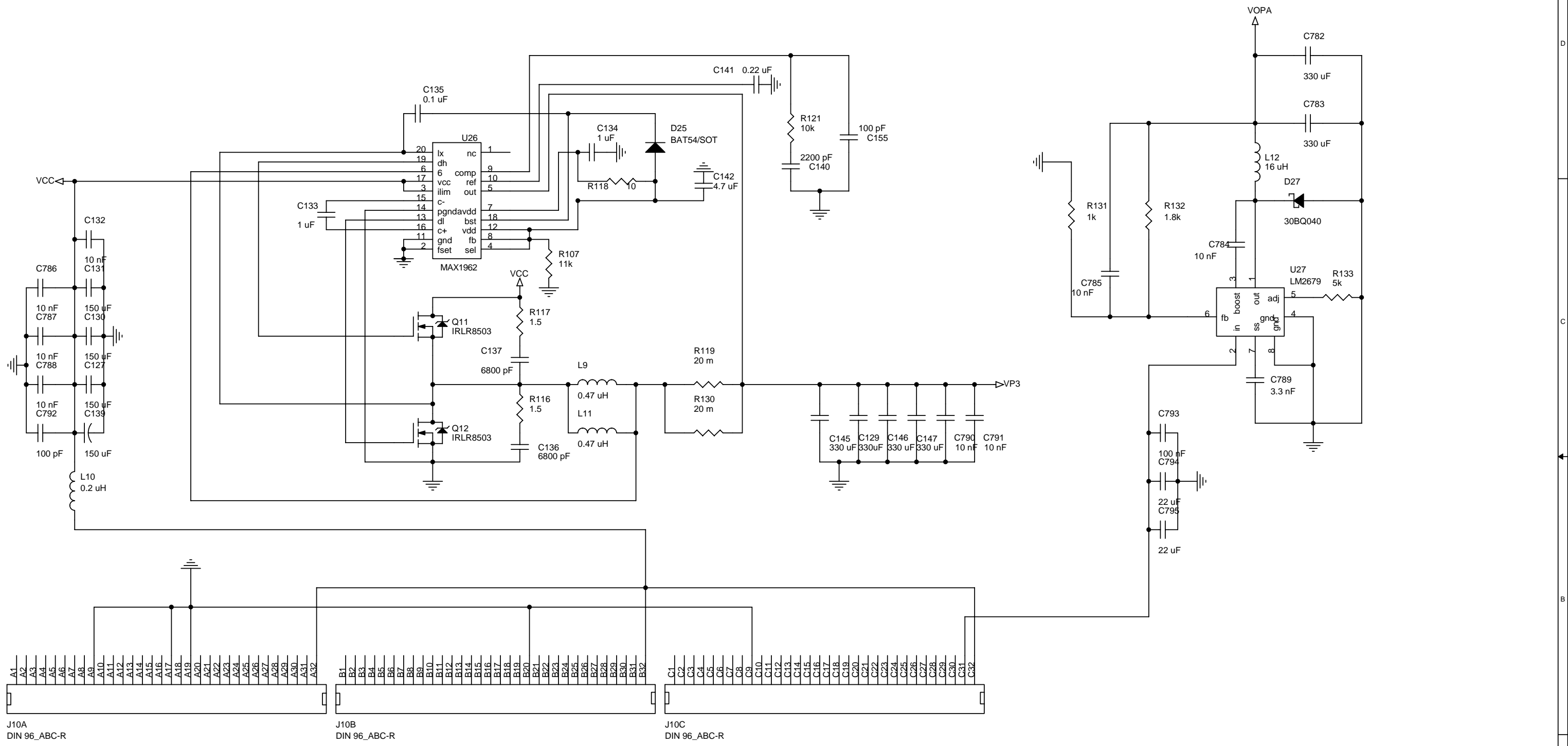
Title		Splitter - termination voltage	
Size	Document Number	Rev	
A3	<Doc>		
Date:	Wednesday, March 03, 2004	Sheet	1 of 8



Title		Splitter - dual receiver	
Size	A3	Document Number	<Doc>
Date:	Wednesday, March 03, 2004	Sheet	3 of 8



Title		
Splitter - dual laser		
Size	Document Number	Rev
A3	<Doc>	
Date:	Tuesday, March 02, 2004	Sheet 7 of 8



Title		
Splitter - power		
Size	Document Number	Rev
A3	<Doc>	
Date:	Tuesday, March 02, 2004	Sheet 8 of 8