

VALON INTENSITEETIN  
MODULOINTI  
NESTEKIDENÄYTÖLLÄ

*Anssi Toivanen*

Opinnäytetutkielma  
Maaliskuu 1995  
Sovelletun fysiikan laitos  
Kuopion yliopisto

## **Esipuhe**

Tämä opinnäytetutkielma on tehty Kuopion yliopiston fysiikan laitoksella vuoden 1994 aikana. Tutkielmani ohjaajina toimivat FL Kari Mantere ja FL Veijo Honkonen, joille haluan esittää parhaimmat kiitokseni. Lisäksi haluan kiittää vaimoani Minnaa ja 1.5-vuotiasta tytärtäni Miljaa kärsivällisyydestä ja ymmärtämyksestä tutkielman kirjoitusvaiheen aikana.

Kuopiossa 23.3.1995

---

Anssi Toivanen

KUOPION YLIOPISTO, luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta  
Fysiikan koulutusohjelma

Lääketieteellisen elektroniikan linja

TOIVANEN ANSSI T.: Valon intensiteetin modulointi nestekidenäytöllä

Opinnäytetutkielma, 72 s., 3 liitettä (9 s.)

Opinnäytetutkielman ohjaajat :

FL Kari Mantere ja

FL Veijo Honkonen

Maaliskuu 1995

---

Avainsanat: nestekidenäytöt, intensiteetin modulointi, optinen laskenta

Nestekidenäyttö ei säteile valoa, vaan moduloi siihen kohdistettua ulkoista valoa. Tässä opinnäytetutkielmassa perehdytään nestekidenäyttöihin ja niiden soveltamiseen intensiteettimodulaattoreina.

Teoriaosassa käsitellään nestekidenäyttöjen toimintaperiaatteita ja niiden soveltamista paikkamodulaattoreina. Nestekidenäytöt luokitellaan eri elektro-optisten ja dielektristen ilmiöiden perusteella näyttötyyppeihin, joiden ominaisuudet riippuvat nestekidemateriaalin molekyyliarakenteesta.

Useimmilla näytöillä on samankaltainen kerrosrakenne, johon on kerrostettu kiteen optisia ominaisuuksia parantavia kalvoja ja näytön ohjaukseen liittyviä sähköisiä tai optisia ohjausrakenteita. Nestekidenäyttöjä käytetään kaksiuotteisina paikkamodulaattoreina moduloimaan valoallon intensiteettiä, vaihetta ja polarisaatiota. Paikkamodulaattoreilla voidaan toteuttaa optisesti yksinkertaista aritmetiikkaa, matriisioperaatioita, loogisia operaatioita ym. optista laskentaa, joita käyttäen voitaisiin periaatteessa toteuttaa hybridi optoelektroninen tietokone.

Kokeellisessa osassa pyrittiin suorittamaan kolmella nestekidenäytöllä yhteen- ja kertolaskuoperaatiot. Tietokoneen kuvakortilla ohjattavia nestekidenäyttöjä valaistiin yhdensuuntaisella lasersäteellä ja detektorina oli kuvakortilla ohjattu CCD-kamera. Ensimmäiseksi suunnattiin kaksi kennoa peräkkäin, jolloin voitiin kokeilla loogisia operaatioita ja kertolaskua. Kahdella peräkkäisellä näytöllä toteutettiin AND- ja NAND-operaatiot. Seuraavassa vaiheessa suunnattiin systeemiin kolmas näyttö säteenjakajan kanssa, jolla voitiin kokeilla optista yhteen- ja kertolaskusysteemiä. Kolmen näytön systeemillä toteutettiin OR- ja NOR-operaatiot.

---

# SISÄLLYSLUETTELO

---

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Nestekiteet</b>	<b>4</b>
2.1	Nestekidetila . . . . .	4
2.2	Nestekidetyypit . . . . .	5
2.3	Nestekiteiden rakenne . . . . .	5
2.4	Molekyylirakenne . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Näyttötyypit</b>	<b>8</b>
3.1	Näytön kerrosrakenne . . . . .	8
3.2	Dynaaminen sironta . . . . .	10
3.3	Kiertonemaattinen muoto . . . . .	10
3.4	Kahtaistaittavat näytöt . . . . .	14
3.5	Vieras-isäntä-näytöt . . . . .	15
3.6	Smektiset näytöt . . . . .	16
3.6.1	Faasinmuutokseen perustuva smektinen näyttö . . . . .	16
3.6.2	Ferrosähköinen näyttö . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Näytön ohjaustekniikat</b>	<b>20</b>
4.1	Sähköinen osoitus . . . . .	20
4.1.1	Multipleksoiva osoitus . . . . .	20
4.1.2	Diodiosoitus . . . . .	22
4.1.3	Varistoriosoitus . . . . .	24
4.1.4	Transistoriosoitus . . . . .	24
4.2	Optinen osoitus . . . . .	28
4.2.1	Laserosoitus . . . . .	28

4.2.2	Valo-osoitus . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Optinen modulointi</b>	<b>34</b>
5.1	Kaksiulotteiset paikkamodulaattorit . . . . .	34
5.2	Nestekidepaikkamodulaattori . . . . .	35
5.2.1	Kiertonemaattinen nestekidepaikkamodulaattori . . . . .	35
5.2.2	Ferrosähköinen nestekidepaikkamodulaattori . . . . .	44
5.3	Optinen laskenta . . . . .	48
5.3.1	Optinen numeerinen prosessointi . . . . .	48
5.3.2	Loogiset operaatiot . . . . .	48
<b>6</b>	<b>Kokeellinen osa</b>	<b>50</b>
6.1	Laitteisto . . . . .	50
6.2	Mittaussysteemi . . . . .	51
6.3	Systeemin linjaus . . . . .	52
6.4	Mittaukset . . . . .	54
6.5	Tulokset . . . . .	56
<b>7</b>	<b>Työn tarkastelu</b>	<b>59</b>
	<b>Viitteet</b>	<b>61</b>
	<b>Liitteet</b>	<b>64</b>
<b>A</b>	<b>Optisen kertolaskusysteemin kuvat</b>	<b>64</b>
<b>B</b>	<b>Optisen kerto- ja yhteenlaskusysteemin kuvat</b>	<b>68</b>
<b>C</b>	<b>Diffraktio- ja reunakuvio</b>	<b>72</b>

Halpoja nestekidenäyttöjä käytetään usein paikkamodulaattoreina optisessa tietojenkäsittelyssä ja optisessa laskennassa. Nestekidenäyttöjä käytetään pääasiassa intensiteetti- ja vaihemodulaattoreina.

Eri nestekidetyyppien optiset ominaisuudet riippuvat niiden molekyyli-rakenteesta. Luvussa 2 on käsitelty juuri nestekiteiden rakennetta. Nestekidenäyttöjä on monenlaisia, mutta niillä on samankaltainen kerrosrakenne. Vaikka nestekidenäytöt periaatteessa perustuvat valoallon moduloimiseen sähkökentällä orientoitavien molekyylien avulla, niin nestekidenäytöt voidaan toteuttaa monella tavoin. Luvussa 3 on esitelty eri tyyppisiä nestekidenäyttöjä ja niiden toimintaa. Nestekidenäytöille on kehitetty monia ohjausrakenteita, jotka ovat joko sähköisiä tai optisia. Sähköisistä ohjausrakenteista yleisin on transistoriohjaus ja optisista valo-ohjaus. Ohjausrakenteita on esitelty luvussa 4.

Nestekidepaikkamodulaattoreilla voidaan muuttaa valoallon intensiteettiä, vaihetta ja polarisaatiota. Luvussa 5 on käsitelty kiertonemaattisen ja ferrosähköisen nestekiteen valon intensiteetin modulointiominaisuuksia.

Kokeellisessa osassa luvussa 6 on esitetty optinen kerto- ja yhteenlaskusysteemi, jolla on toteutettu optisesti binäärilogiikan AND-, NAND-, OR- ja NOR-operaatiot.

## 2.1 Nestekidetila

Aineella on kolme perusolomuotoa: kiinteä, neste ja kaasu. Monet orgaaniset aineet muuttuvat kiinteästä aineesta isotrooppiseksi nesteeksi tietyn välitilan kautta, jota kutsutaan nestekidetilaksi eli mesofaasiksi. Molekyylien osittainen järjestyminen mesofaasissa on joko siirtyvä (translational) tai kierteinen (rotational), tai molempia. Molekyylien siirtojärjestykseen ei vaikuta molekyylien muoto, kun taas kiertojärjestys esiintyy vain ei-pallomaisilla molekyyileillä. On olemassa kaksi erilaista mesofaasia: epäjärjestynyt kidemesofaasi (disordered crystal mesophase) ja järjestynyt nestemesofaasi (ordered fluid mesophase). Epäjärjestyneellä kidemesofaasilla on kolmiulotteinen kidehila, mutta sillä on huomattava kiertoepäjärjestys. Järjestyneellä nestemesofaasilla ei ole kidehilaa. Se on neste, jolla on kiertojärjestys [1].

Epäjärjestäytyneitä kidemesofaaseja nimitetään ”muovautuviksi kiteiksi”, joiden molekyylit ovat muodoltaan pallomaisia. Molekyylien pallomaisuudesta johtuen kiertoenergia on pienempi kuin hilaenergia. Lämpötilan noustessa molekyylit tulevat energieettisemmiksi ja ylittävät kiertoenergian, mutta eivät hilaenergiaa. Tällöin molekyylit ovat siirtojärjestyksen mukaan hyvin järjestäytyneet. Lämpötilan yhä noustessa molekyylien energia ylittää hilaenergian, jolloin hilarakenne rikkoutuu ja aineesta tulee isotrooppinen neste. Muovautuvien kiteiden muotoa voidaan muuttaa paineella [1].

Järjestyneitä nestemesofaaseja kutsutaan nestekiteiksi (liquid crystals, LC), jotka useimmiten muodostuvat pitkänomaisista eli sauvamaisista molekyyleistä. Molekyyleillä on kiertojärjestystä, vaikka hila on tuhoutunut, jolloin mesofaasi on järjestynyt nestefaasi. Sillä on samanaikaisesti nesteen ja kiinteän aineen ominaisuuksia [1].

## 2.2 Nestekidetyypit

Nestekidemesofaaseja on kaksi: termo- ja lyotrooppinen. Termotrooppiset nestekiteet syntyvät lämpötilan nousun aiheuttamassa sulamisessa. Termotrooppiset nestekiteet ovat tärkein nestekiteiden tutkimuskohde ja käytetyin elektro-optisten näyttöjen, lämpötila- ja paineantureiden sovelluksissa. Termotrooppiset nestekidefaasit ovat tavallisesti orgaanisia aineita esim. MBBA (N-(p-methoxybenzylidene)-p'-n-butylaniline). Lyotrooppiset nestekiteet ovat epäisotrooppisia liuosmesofaaseja, jotka syntyvät liuottamalla. Lyotrooppisia nestekiteitä käytetään biologisissa sovelluksissa [1].

## 2.3 Nestekiteiden rakenne

Nestekiteet jaetaan molekyylien järjestäytymisen mukaan kolmeen pääluokkaan: nemaattisiin, kolesteerisiin ja smektisiin. Molekyylien pitkän akselin keskimääräistä suuntaa sanotaan suuntavektoriksi  $\mathbf{n}$ . Kuvassa 2.1 on esitetty nestekiteiden pääluokat ja suuntavektori  $\mathbf{n}$  [2]. Molekyylin järjestymistä kuvataan järjestäytymisparametrillä  $S$

$$S = \frac{1}{2}(3\overline{\cos^2\theta} - 1), \quad (2.1)$$

missä  $\theta$  on suuntavektorin ja molekyylin pitkän akselin välinen kulma sekä  $\overline{\cos^2\theta}$  on  $\cos\theta$ :n keskiarvon neliö.  $S = 1$ , kun kaikki molekyylit ovat asettuneet suuntavektorin suuntaisesti ja  $S = 0$ , kun molekyylit ovat asettuneet satunnaisesti kuten isotrooppisessa nesteessä [3].

Nemaattisessa rakenteessa molekyylit ovat asettuneet yhdensuuntaisesti pitkän akselin suuntaan, mutta voivat liikkua kaikkiin kolmeen suuntaan ja pyöriä pitkän akselinsa ympäri [2]. Sen vuoksi nemaattisella rakenteella on vain yksiulotteinen järjestys ja se on nestemäisin nestekiderakenteista. Nämä aineet ovat optisesti yksiaksellisia ja niiden taitekertoimet ovat voimakkaasti suunnasta riippuvia [3].

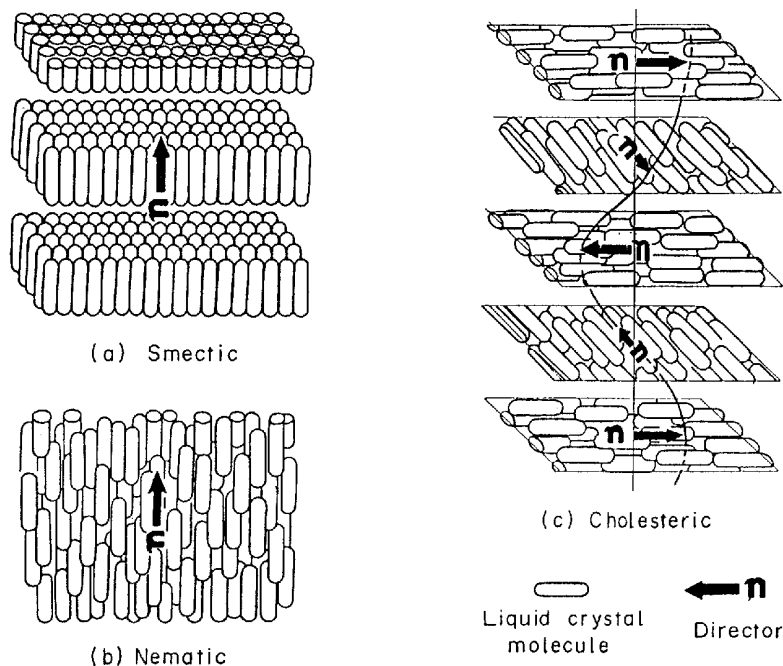
Kolesteerinen rakenne muodostuu nemaattisista kerroksista, joiden suuntavektorit  $\mathbf{n}$  kiertyvät toisiinsa kerroksiin nähden siten, että

$$\begin{aligned} n_x &= \cos(q_0 z + \varphi) \\ n_y &= \sin(q_0 z + \varphi) \\ n_z &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

missä  $z$  on kiertoakselin suuntavektori ja  $\varphi$  vaihekulma. Kolesteerinen rakenne on jaksollinen, jonka jakso on

$$L = \frac{\pi}{|q_0|} \quad (2.3)$$





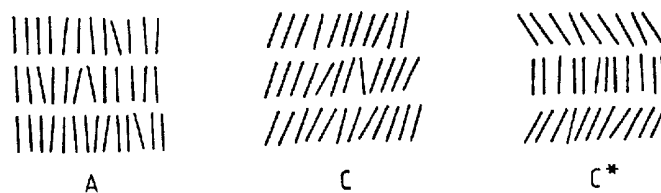
**Kuva 2.1:** Nestekiteiden pääluokat:(a) smektinen, (b) nemaattinen ja (c) kolesteerinen rakenne [3].

$q_0$ :n merkki määrää kiertosuunnan ja suuruus jakson. Kun  $q_0 = 0$ , niin rakenne on nemaattinen eli jakso on ääretön [1].

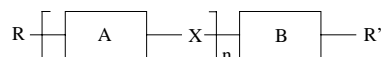
Smektinen rakenne muistuttaa eniten kiinteää ainetta. Sillä on kerrosrakenne, jossa kerrokset pääsevät liikkumaan toistensa suhteen. Smektiset rakenteet jaetaan kolmeen pääluokkaan: smektinen A-, C- ja B-rakenne. Kuvassa 2.2 on esitetty A- ja C-rakenne [2].

Smektisessä A-rakenteessa molekyylit ovat asettuneet samansuuntaisesti kohtisuoraan kerrosta vastaan. Kerrokset voivat liukua toisiinsa nähden. Kerroksen paksuus on molekyylien pituus. Smektinen A-rakenne on optisesti yksiakselinen [1].

Smektisessä C-rakenteessa kerroksen paksuus on pienempi kuin molekyylien pituus, koska molekyylit ovat kallistuneet tiettyyn kulmaan kerroksen normaaliin nähden. Tämän vuoksi smektinen C-rakenne on optisesti kaksiakselinen [1]. Kiraalisessa smektisessä C-rakenteessa kallistuskulma kiertyy kerrosten normaalin ympäri siirryttäessä kerroksesta toiseen, jolloin suuntavektori  $\mathbf{n}$  liikkuu kartiopinnalla. Kiraalinen smektinen C on ferrosähköinen ja sitä merkitään  $C^*$ . Rakenne on esitetty kuvassa 2.2 [2].



**Kuva 2.2:** Smektinen A, C ja C\* [2].



**Kuva 2.3:** Nestekidemolekyylin periaatteellinen rakenne.

Smektinen B-rakenne on smektisistä rakenteista järjestynein. Kerroksilla on 2-ulotteisen kiinteän aineen jaksollisuus ja jäykkyys, mutta kerrokset voivat liukua toisiinsa nähden varsin helposti [1].

## 2.4 Molekyylirakenne

Pelkistetysti sanottuna nestekidemateriaalin molekyylit ovat pitkänomaisia ja jäykkiä. Ensimmäisen ryhmän muodostavat kolesteeriset nestekiteet, joiden molekyyli koostuu kahdesta aromaattisesta jäykästä ryhmästä A ja B, linkkiryhmästä X sekä hännistä R ja R' [2].

Aromaattiset ryhmät voivat olla bentseenirenkaita, sykloheksaani- tms. ryhmiä ja hännät alkyyl-, amino-, jodi- yms. ryhmiä. Nestekiteellä on ferrosähköisiä ominaisuuksia, jos hännässä on epäsymmetrisesti hiiliatomeita. Linkkiryhmät määräävät molekyylin stabiilisuuden eri olosuhteissa [2].

Toisen ryhmän molekyyli voidaan esittää kuvan 2.3 mukaan, missä  $n = 0, 1, \text{ tai } 2$ . Toinen ryhmä eroaa ensimmäisestä ryhmästä siten, että toinen aromaattinen ja linkkiryhmä voi puuttua tai olla kaksinkertainen. Tähän ryhmään kuuluvat nemaattiset ja smektiset nestekiteet [1].

Nestekide on anisotrooppinen aine, koska sen ominaisuudet riippuvat suunnasta. Näitä anisotrooppisia ominaisuuksia ovat permittiivisyys, taitekerroin, viskositeetti, magneettinen susceptibiliteetti ja sähköinen johtavuus. Jos permittiivisyys molekyylin pituussuunnassa on  $\varepsilon_{\parallel}$  ja poikittaissuunnassa  $\varepsilon_{\perp}$ , niin permittiivinen anisotropia on  $\Delta\varepsilon = \varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}$ . Jos nestekidemateriaalin permittiivinen anisotropia  $\Delta\varepsilon$  on positiivinen, niin sitä kutsutaan p-tyypin nestekidemateriaaliksi ja sen molekyylit asettuvat ulkoisessa sähkökentässä kentän suuntaiseksi. Kun taas  $\Delta\varepsilon$  on negatiivinen, niin kyseessä on n-tyypin nestekidemateriaali ja molekyylit asettuvat kohtisuoraan ulkoista sähkökenttää vastaan [3].

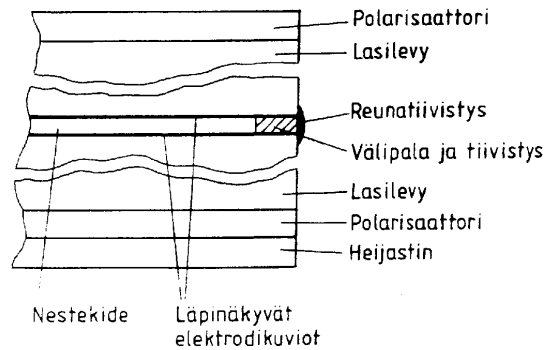
Optisesti anisotrooppisten materiaalien taitekerroin on erilainen materiaalin eri suunnissa. Näitä materiaaleja kutsutaan kahtaistaittaviksi aineiksi. Valoaallon osuessa anisotrooppiseen kiteeseen satunnaisessa kulmassa kiteen optiseen akseliin nähden, valoaalto jakautuu kahteen aaltoon: palloaaltoon, jota kutsutaan ordinaariaalloksi ja ellipsoidiseen aaltoon, jota kutsutaan ekstraordinaariaalloksi. Ordinaariaallon taitekerrointa merkitään  $n_0$  ja ekstraordinaariaallon  $n_e$ . Taitekertoimen anisotropia  $\Delta n = n_e - n_0$ , jota kutsutaan kahtaistaittavuudeksi [4].

Vaikka periaatteessa valon kulkuun vaikutetaan vain muuttamalla nestekidemolekyylien asentoa, voidaan nestekidenäytöt (liquid crystal display, LCD) toteuttaa monellakin tavalla. Eri nestekidenäyttöttyyppejä on esitelty kappaleissa 3.2-3.6 [2].

### 3.1 Näytön kerrosrakenne

Eri näyttötyypeillä on samankaltainen kerrosrakenne, joka on esitetty kuvassa 3.1.

Nestekidemateriaali asetetaan kahden lasilevyn väliin, jotka usein val-



**Kuva 3.1:** Nestekiteen kerrosrakenne [2].

mistetaan natriumkalkista ja boorisilikaatista. Lasilevyiltä vaaditaan suurta pinnan tasaisuutta, koska ohuimmat nestekidekerrokset ovat  $1\mu\text{m}$  paksuja. Läpinäkyvät elektrodit ovat kerrosrakenteessa nestekidekerroksen molemmilla puolilla kiinnitettynä lasilevyihin. Elektrodikalvot valmistetaan oksideista, joista yleisimmät ovat tinaoksidi ja indiumtinaoksidi (ITO) [2].

Näytön kontrastin maksimoimiseksi on molekyylien oltava samansuuntaisia koko nestekidekerroksen läpi. Pintavoimiin perustuvalla alkuorientoinnilla saadaan molekyylit asettumaan halutun suuntaiseksi. Pinnan suuntainen eli homogeeninen orientaatio saadaan syntymään, kun lasipinnan kriittinen pintajännite on suurempi kuin nestekiteellä. Kun taas lasin pintajännite on pienempi kuin nestekiteellä, muodostuu pintaa vastaan kohtisuora eli homeotrooppinen orientaatio. Homogeenisen orientoinnin aikaan saamiseksi elektrodikalvo päällystetään pitkäketjuisella polymeerillä ja kiilloitetaan hankaamalla yhteen suuntaan, jolloin syntyy mikrouritus. Pinnan läheisyydessä olevat nestekidemolekyylit asettuvat energiaminimin mukaisesti urien suuntaisesti. Homeotrooppisessa orientoinnissa pinnoitteen pitkät molekyylit tarttuvat pintaan ja niiden pitkät hiilivetyketjut jäävät kohtisuoraan pintaa vastaan. Pinnan lähellä olevat nestekidemolekyylit asettuvat myös pintaa vastaan kohtisuoraan. Pinnoitteena käytetään lesitiiniä ja silaaneja [2].

Nestekidekerroksen tiivistykseen käytetään lasisulatetta, kestonuoveja ja orgaanisia polymeeritiivisteitä. Suuremmissa näytöissä käytetään lasikuituja ja -helmiä välikappaleina nestekidetilän paksuuden asettelussa. Polarisaattorit valmistetaan selluloosa-asetaattikerroksista, joiden välissä on jodia ja polyvinyylialkoholia. Uloimpana suojakerroksena käytetään akryylimuovia. Nestekidekerrosrakenteen alimmaista polarisaattoria nimitetään analysaattoriksi. Joissakin näyttötyypeissä käytetään analysaattorin alla alumiini-, titaanioksidi- tai bariumsulfaattipastaa heijastimena. Eri kerrosten ra-

japinnoista heijastuu valoa. Heijastusta vähennetään käyttämällä kerrosten välissä materiaalia, jonka taitekerroin on rajapinnan muodostavien aineiden taitekertoimien välillä [2].

### 3.2 Dynaaminen sironta

Nemaattisella nestekidemateriaalilla, jolla on negatiivinen permittiivinen anisotropia  $\Delta\epsilon$ , esiintyy dynaamista sirontaa. Jos kiteeseen ei vaikuta sähkökenttää, molekyylit ovat asettuneet homeotrooppisesti. Heikolla sähkökentällä molekyylit asettuvat homogeenisesti. Lisättäessä kentän voimakkuutta alkaa muodostua vuorottelevia tummia ja vaaleita alueita, Williamsin alueita, molekyylin siirtymisen vuoksi. Lisättäessä vielä kentän voimakkuutta alkaa syntyä molekyylin pyörteisiä virtauksia, jolloin rakenne rikkoutuu alueiksi, joiden optisen akselin suunta vaihtelee ajan ja paikan suhteen. Nämä häiriöalueet aiheuttavat voimakasta valon sirontaa. Aktivoitu alue näkyy sameana ja aktivoimaton kirkkaana [2].

Dynaamiseen sirontaan perustuvilla näytöillä on useita huonoja ominaisuuksia. Sen kontrastiominaisuudet eivät ole hyvät, johtuen siitä, että kuvaan ei saada teräviä reunoja. Harmaatasokuva on myös huono. Kiteen käyttöikä on lyhyempi verrattuna muihin nestekidemateriaaleihin [3].

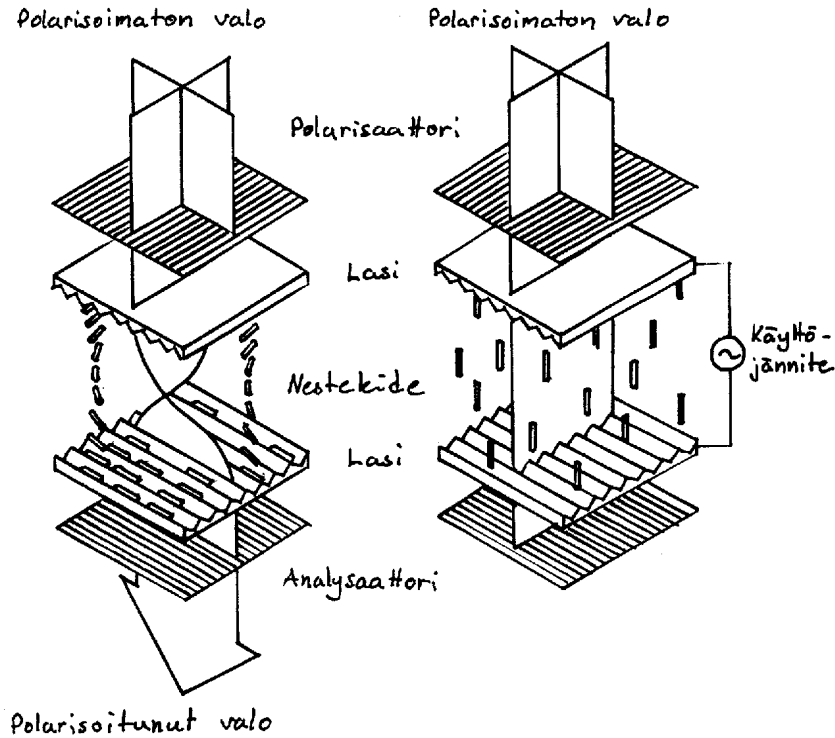
### 3.3 Kiertonemaattinen muoto

Kiertonemaattiset nestekidenäytöt (twisted nematic liquid crystal display, TN-LCD) ovat yleisimpiä sovelluksissa käytettyjä näyttöjä.

Nestekidekerroksen reunoilla olevien lasilevyjen alkuorientointipäällesteet ovat uritettu toisiinsa nähden kohtisuoraan, jolloin molekyylin suunta kääntyy nestekidekerroksen läpi mentäessä  $90^\circ$ . Kuvassa 3.2. on esitetty kaavakuva kiertonemaattisen kennon rakenteesta ja toiminnasta. Nestekidemateriaalin permittiivinen anisotropia  $\Delta\epsilon$  on positiivinen. Polarisaattori ja analyysointilaite on asetettu kohtisuoraan toisiinsa nähden [2].

Polaroimaton valo osuu polarisaattoriin, jossa valo polaroituu lineaarisesti. Kun jännitettä ei ole kytketty elektrodien välille, kerroksen läpi menevän valon polarisaatiotaso kääntyy  $90^\circ$  ja läpäisee analyysointilaite. Kytkettäessä kennoon jännite, molekyylit kääntyvät sähkökentän suuntaisiksi, jolloin polarisaattorin läpäisseen lineaarisesti polaroidun valon polarisaatiotaso ei käännä ja valo ei läpäise analyysointilaite. Aktivoitu alue näkyy mustana kirkkaalla taustalla. Jos polarisaattori ja analyysointilaite ovat saman suuntaisesti, nähdään aktivoitu alue kirkkaana mustalla taustalla [2].

Molekyylin kääntyminen alkaa kerroksen keskeltä, kun ylitetään kapasitiivinen eli permittiivinen kynnysjännite. Kapasitiivinen kynnysjännite on pie-



**Kuva 3.2:** Kiertonemaattisen nestekidekennon toimintaperiaate.

nempi kuin optinen kynnysjännite, jolla kierto häviää kokonaan [1]. Sähkökenttä ei pysty kääntämään pinnan läheisyydessä olevia pinnoituksen mukaisesti asettuneita molekyylejä [2].

Jotta valo läpäisisi nestekidekerroksen lineaarisesti polaroituna, seuraavan epäytälön täytyy toteutua

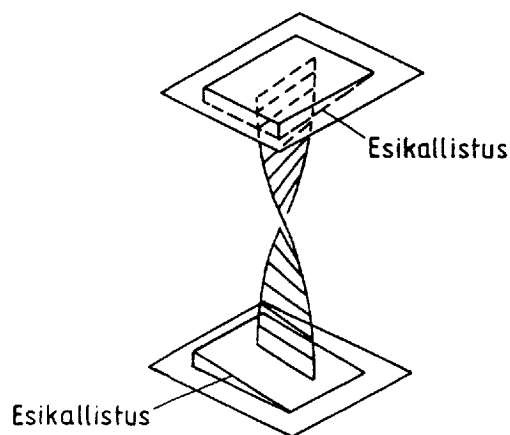
$$d\Delta n \gg \frac{\lambda}{2} \quad (3.1)$$

missä  $d$  on nestekidekerroksen paksuus,  $\lambda$  on tulevan valon aallonpituus ja  $\Delta n$  on nestekiteen taitekertoimen anisotropia [3].

Kiertonemaattisella näytöllä katselukulma ei ole kovin laaja. Optimaalinen kulma voidaan asettaa johonkin katselukulman neljännekseen alkuorientoinnilla ja lisäämällä materiaaliin kiraalista nestekidemateriaalia. Käyttöjännitteen lisääminen suurentaa katselukulmaa, mutta aiheuttaa ylikuulumista (crosstalk), jolloin tumma alue alkaa vaalentua [2].

Jos nestekidekerroksessa esiintyy molekyylien kiertymistä vastakkaiseen suuntaan, joka aiheuttaa optisen epäjatkuvuuskohdan, seostetaan nemaattiseen materiaaliin vähän kolesterista materiaalia [2].

Jos jännitteen olleessa kytkettynä esiintyy epäsäännöllisiä täpliä, niin nes-



**Kuva 3.3:** Esikallistus [2].

tekidekerroksen keskialueella suuntavektorin kallistus on vastakkainen verrattuna muihin molekyyliin. Ongelman poistamiseen käytetään pientä esikallistusta lasilevyjen pinnoilla kuvan 3.3. mukaisesti siten, että kerroksen keskellä molekyylin kallistus on nolla [2].

Kiertonemaattisen negatiivisen ja positiivisen kennon elektro-optisia ominaisuuksia on esitetty kuvassa 3.4. Negatiivisessa kennossa polarisaattori ja analysaattori ovat samansuuntaiset ja positiivisessa kennossa polarisaattori ja analysaattori ovat kohtisuorassa toisiaan vastaan. Suhteellinen valon läpäisy määritellään

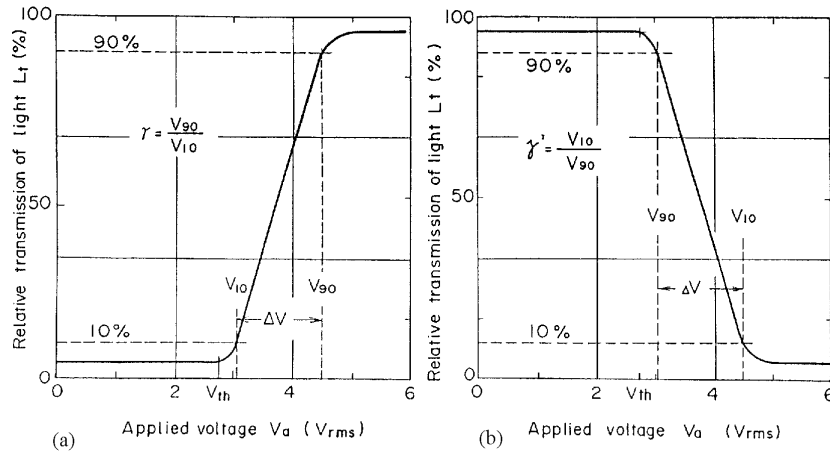
$$L_t = \frac{\text{kennosta tuleva valo}}{\text{kennoon tuleva valo}} \times 100 (\%). \quad (3.2)$$

Kiertonemaattisen kennon käyttöjännitteenä käytetään vaihtojännitettä, jotta vältetään kemiallisten vaikutusten aiheuttamaa kennon heikentymistä. Jännitteen kasvaessa yli kynnysjännitteen  $V_{th}$  valon läpäisy kasvaa / vähenee nopeasti. Jos  $V(t)$  on kennoon vaikuttava ajasta riippuva jaksollinen jännite, niin sen tehollinen arvo  $V_a$  on

$$V_a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [V(t)]^2 dt}, \quad (3.3)$$

missä  $T$  on aaltomuodon jakso [3].

Valon läpäisy ei kasva monotonisesti heti jännitteen kytkemisen jälkeen, vaan alkaa lisääntyä muutaman jakson aikana. Tarvitaan monta jaksoa, jotta saavutetaan maksimiläpäisytila. Tätä ilmiötä kutsutaan sähköenergian kasaantumiseksi. Kuvan 3.5 transienttivasteesta nähdään kyseinen ilmiö [3].



**Kuva 3.4:** Negatiivisen (a) ja positiivisen (b) kiertonemaattisen kennon suhteellinen läpäisy  $L_t$  käyttöjännitteen  $V_a$  funktiona.  $V_{10}$  ja  $V_{90}$  ovat jännitteet, joilla suhteellinen läpäisy on 10 % ja 90 % [3].

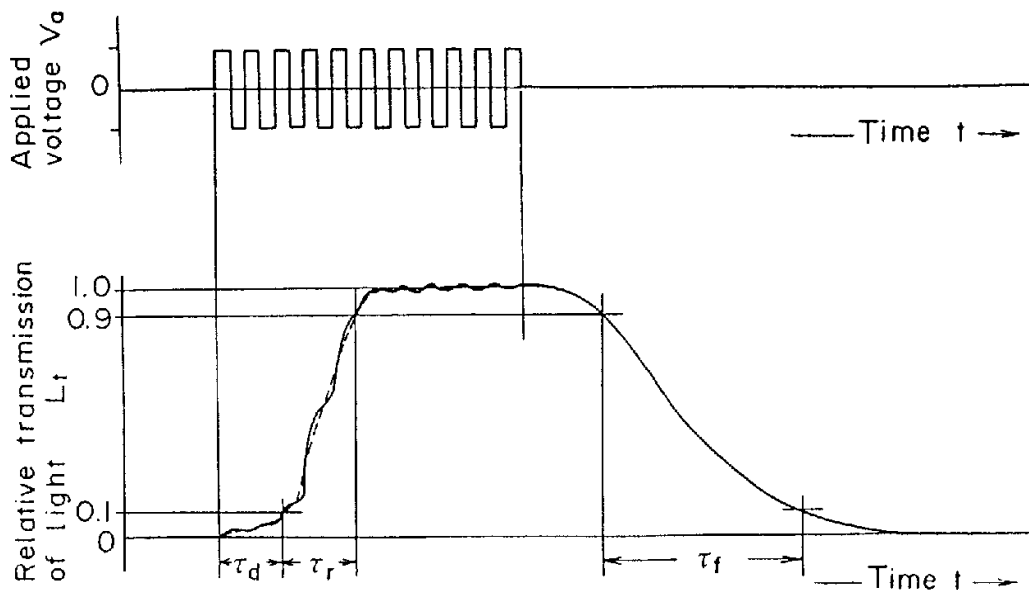
Kennon dynaamista toimintaa kuvataan kolmella vakiolla: viiveellä  $\tau_d$ , nousuajalla  $\tau_r$  ja laskuajalla  $\tau_f$ . Viivettä kutsutaan myös kuolleeksi ajaksi ja määritellään ajaksi, joka kuluu valon läpäisyn nousuun 10 % lopullisesta arvosta. Nousuaika on aika, joka kuluu läpäisyn nousuun 10 %:sta 90 %:iin lopullisesta arvosta. Laskuaika on aika, joka kuluu läpäisyn vähenemiseen 90 %:sta 10 %:iin maksimi arvosta. Tyypilliset vakioiden arvot huoneen lämpötilassa kiertonemaattiselle kennolle ovat:  $\tau_d$  on useita millisekunteja,  $\tau_r = 10 \dots 100$  ms ja  $\tau_f = 20 \dots 200$  ms. Nousu- ja laskuaika ovat lämpötilasta riippuvia. Lämpötilan noustessa nestekidemateriaalin viskositeetti pienenee, jolloin nousu- ja laskuajat lyhenevät [3].

Kuvan kontrastisuhde  $C_r$ , joka määritellään valon läpäisyn maksimin ja minimin suhteena, riippuu kennon katselukulmasta. Katselukulma riippuvuutta voidaan pienentää asettamalla polarisaattorien polarisaatioakselit lähes nestekiteen lasipintaan kiinnittyneiden molekyylien suuntaisiksi. Yleensä polarisaattorien akselien välinen kulma on pienempi kuin  $90^\circ$ , jotta saavutetaan laajin katselukulma maksimikontrastilla [3].

Kiertonemaattisesta nestekidekennosta saadaan värillinen käyttämällä värisaturaatio polarisaattoreita, jotka läpäisevät tietyn valon värikomponentin [3].

Superkiertävässä nemaattisessa muodossa kiertokulma on  $180 \dots 360^\circ$ .





**Kuva 3.5:** Nestekidekennon suhteellinen läpäisy  $L_t$  ajan  $t$  funktiona.  $V_{10}$  ja  $V_{90}$  ovat jännitteet, joilla suhteellinen läpäisy on 10 % ja 90 % [3].

Suuri kiertokulma saadaan aikaan käyttämällä kolesteerista saostusta, sopivaa kierteen nousun ja kerroksen paksuuden suhdetta sekä homogeenista alkuorientointia suurelle esikallistuskulmalla. Suurella esikallistuskulmalla ehkäistään  $90^\circ$  muodon syntyminen. Polarisaattorin ja analysaattorin väliseksi kulmaksi asetetaan  $60^\circ$ , koska aktivoitussa tilassa esiintyy vielä jäännöskiertymää. Optimaalisin kiertokulma on  $270^\circ$ . Suurempia kiertokulmia on vaikeampi toteuttaa, koska pienemmät kiertokulmat häiritsevät [2].

### 3.4 Kahtaistaittavat näytöt

Kuten aikaisemmin mainittiin, valo jakautuu ordinaari- ja ekstraordinaarisäteeseen, kun se osuu anisotrooppiseen aineeseen. Tällä kahtaistaittavuudella saadaan aikaiseksi vaiheviive polaroidun valon kahdelle toisiinsa nähden kohtisuoralle komponentille. Muuttamalla sähköisesti vaiheviivettä, eri värien aallonpituudet voidaan joko laskea läpi tai sulkea. Kahtaistaittavia näyttöjä on kahta tyyppiä, joita kutsutaan DAP- (deformation-of-vertical-aligned-phase) ja HAN-näytöiksi (hybrid-aligned-nematic) [3].

Värillisen DAP-muodon nestekidekennon permittiivinen anisotropia  $\Delta\epsilon$  on negatiivinen. Molekyylit ovat asettuneet kohtisuoraan elektrodeja vas-

taan ja polarisaattorien polarisaatiotasot ovat kohtisuorassa. Ilman jännitettä polarisaattorin läpäissyt lineaarisesti polaroitunut valo ei läpäise analysaattoria, koska valon polarisaatiotaso on kohtisuorassa analysaattoria vastaan. Käyttöjännitteen vaikutuksesta molekyylit asettuvat kohtisuoraan sähkökenttää vastaan, jolloin ordinaari- ja ekstraordinaarivalon komponentit interferoivat keskenään ja elliptisesti polaroitunut valo läpäisee nestekidekerroksen. Analyysaattori laskee läpi tietyn spektrialueen elliptisesti polaroituneesta valosta, jolloin kennon läpäissyt valo on värillinen. Jos sisään menee valkoista valoa, niin eri jännitteen arvoilla ulos tulee eri väristä valoa. Monivärinäyttö voidaan siis toteuttaa muuttamalla käyttöjännitettä. DAP-näytön värialue on liian kapea näkyvällä alueella, joten se ei riitä luonnollisille värikuville [3].

Tasomuotoisessa kennossa nestekiteen permittiivinen anisotropia  $\Delta\epsilon$  on positiivinen, molekyylit ovat asettuneet homogeenisesti ja polarisaattorien välinen kulma on  $45^\circ$ . Tämän tyyppin kenno on helpommin ohjattavissa kuin DAP-muodon kenno. Väriin puhtaus on suhteellisen hyvä ja väri vaihtelut ovat pieniä, koska molekyylin kallistuskulma pysyy vakiona. Tällä muodolla on kuitenkin samat huonot ominaisuudet kuin DAP-muodon kennolla [3].

HAN-muodon kenno on DAP- ja tasomuodon välimuoto, jossa nemaattisen nestekiteen molekyylit ovat asettuneet toisen elektrodin pinnalle homogeenisesti ja toisen homeotrooppisesti. Koska aineen permittiivinen anisotropia  $\Delta\epsilon$  on positiivinen, jännitteen vaikutuksesta molekyylit asettuvat sähkökentän suuntaiseksi eli kohtisuoraan elektrodeja vastaan. HAN-muodon kennolla on hyvät värierotteluominaisuudet verrattuna DAP-muodon kennoon [3].

### 3.5 Vieras-isäntä-näytöt

Vieras-isäntä-näytöissä nemaattiseen ”isäntä” materiaaliin sekoitetaan ”vierasta” väriainetta. Väriaineella on eri absorptiokerroin optisen akselin suunnassa kuin kohtisuoraan sitä vastaan. Väriainemolekyylit asettuvat seoksessa samansuuntaisesti kuin nestekidemolekyylit ja sähkökentän vaikuttaessa kääntyvät niiden mukana [1].

Tasotyyppin vieras-isäntä-nestekidekennossa käytetään vain päällimmäistä polarisaattoria ja homogeenisesti asettunutta nemaattista materiaalia, jonka permittiivinen anisotropia  $\Delta\epsilon$  on positiivinen. Materiaali sisältää 1% väriainetta. Ilman jännitettä suurin osa tulevasta valkoisesta valosta absorboituu väriaineeseen, ja vain kapea värispektrin komponentti läpäisee nestekidekerroksen. Kun jännite on kytketty, molekyylit kääntyvät sähkökentän suuntaiseksi ja valoa absorboituu vain vähän. Aktiivoimaton alue on värillinen ja aktivoitu kirkas. Väriaineen lämpöväriähtely nestekidekerroksen keskellä

huonontaa tasotyypin kennon elektro-optisia ominaisuuksia. Elektro-optisia ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä  $90^\circ$  kiertonemaattista materiaalia. Kuvan kontrastisuhdetta voidaan parantaa käyttämällä kaksinkertaista nestekidekerrosta ja kolesteerisiä nestekidekerroksia [3].

Kolesteeris-nemaattisessa faasinmuutoskennossa kolesteerinen faasi muutetaan jännitteellä nemaattiseksi faasiksi. Kolesteeris-nemaattisia faasinmuutoskennoja on ainakin esitetty kahdenlaisia. Ensimmäisessä rakenteessa värimolekyylit ovat asettuneet homeotrooppisesti ja nestekidekerroksen kierreakseli samansuuntaisesti elektrodien suhteen. Homeotrooppisessa tapauksessa tulevasta valkoisesta valosta vain kapea spektrikomponentti ei absorboidukaan värिमolekyyleihin, jolloin kenno näyttää värilliseltä. Jännitteen vaikutuksesta nestekiteen ja väriaineen molekyylit asettuvat homeotrooppisesti, jolloin valkoinen valo läpäisee kennon lähes muuttumattomana. Toisessa rakenteessa värimolekyylit ovat asettuneet homogeenisesti ja nestekidekerroksen kierreakseli kohtisuoraan elektrodeja vastaan. Valkoisesta valosta vain kapea spektrikomponentti läpäisee rakenteen absorboitumatta värिमolekyyleihin. Jännitteen vaikutuksesta molekyylit asettuvat kentän suuntaseksi ja absorboituminen on vähäistä. Kennojen ominaisuuksia voidaan parantaa käyttämällä kahta nestekidekerrosta. Kokoväri vieras-isäntä-kennoja voidaan toteuttaa käyttämällä monikerroksisia nestekidevärisuodattimia [3].

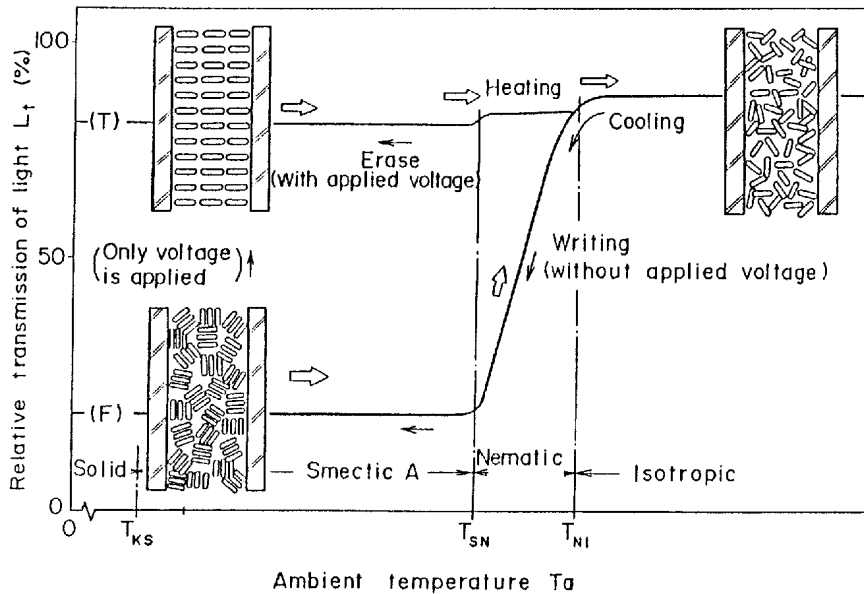
## 3.6 Smektiset näytöt

### 3.6.1 Faasinmuutokseen perustuva smektinen näyttö

Smektisen A-materiaalin sähkö-lämpö-optisia ominaisuuksia (electro-thermo-optical characteristic) on esitetty kuvassa 3.6. Positiivisella permittiivisellä anisotropialla  $\Delta\epsilon$  varustetun smektisen A-materiaalin läpäisy on suuri, koska molekyylit ovat asettuneet kohtisuoraan elektrodeja vastaan. Lämpötilan noustessa tarpeeksi nestekidemateriaali muuttuu nemaattiseksi. Kun lämpötilaa nostetaan lisää, nemaattinen faasi muuttuu isotrooppiseksi nesteeksi. Jos lämpötilaa aletaan laskea, neste muuttuu nemaattisen välitilan kautta taas smektiseksi A-nestekiteeksi [3].

Jos jäädytyksessä ei käytetä käyttöjännitettä, saavutetaan paikallisesti smektinen tila, joka on samea ja läpinäkymätön. Valo siroaa eikä läpäise kennoa. Neste palautuu alkuperäiseksi smektiseksi A-nestekiteeksi, jos jäädytyksessä käytetään voimakasta sähkökenttää. Jos sameassa tilassa olevaa kennoa ei häiritä sähkökentällä tai lämpötilan nostamisella, tila pysyy muuttumattomana kuukausia. Sameasta tilasta päästään suoraan alkuperäiseen tilaan käyttämällä todella suurta sähkökenttää [3].

Faasinmuutokseen perustuvasta smektisestä A-materiaalista on valmis-



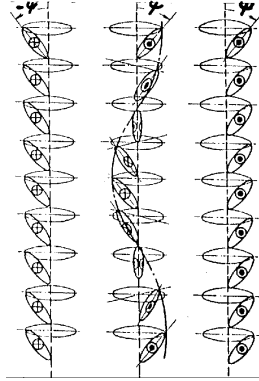
**Kuva 3.6:** Smektisen A-nestekidekennon suhteellinen läpäisy  $L_t$  lämpötilan  $T_a$  funktiona.  $T_{KS}$ ,  $T_{SN}$  ja  $T_{NI}$  esittävät siirrolämpötiloja, joissa kidefaasi muuttuu smektiseksi A-faasiksi, smektinen A-faasi muuttuu nemaattiseksi faasiksi ja nemaattinen faasi muuttuu isotrooppiseksi nesteeksi, ja päinvastoin [3].

tettu vieras-isäntä tyyppinen smektinen A-sähkö-lämpö-optinen-nestekidenäyttö. Ongelmana on lämmittämisestä johtuva suuri tehon kulutus ja hitaus [3].

### 3.6.2 Ferrosähköinen näyttö

Kiraalisella smektisellä C-faasilla  $C^*$  on ferrosähköisiä ominaisuuksia ja se on optisesti aktiivinen. Kiraalisuus johtuu molekyyliarakenteen hännän epäsymmetrisistä hiiliatomeista. Kiraalisen keskuksen paikalla ja konfiguraatiolla on suuri vaikutus siirrolämpötiloihin, kierrekallistuksen suuntaan, kierteen nousun pituuteen, spontaanin polarisaation suuntaan ja polarisaation suuruuteen ferrosähköisessä faasissa. Kiraalisten molekyylien kierteinen järjestys johtuu kallistuksen prekessoinnista kerrostasojen normaalin suhteen edettäessä nestekidekerroksen läpi. Kierre voi olla joko myötä- tai vastapäivään. Kierre kääntää tasopolaroituneen valon tason, kun valo läpäisee faasin. Tätä ominaisuutta kutsutaan optiseksi aktiivisuudeksi [5].

Ferrosähköisen smektisen  $C^*$ -nestekiteen molekyyliellä on sähköinen di-



**Kuva 3.7:** Smektisen  $C^*$ -nestekiteen molekyylien kiertyminen [3].

polimomentti, joka on kohtisuorassa molekyylin akseliin ja kallistustasoon nähden (Kuva 3.7). Dipolimomentit kiertyvät kierreakselin ympäri kuten molekyylin pitkät akselit. Sen vuoksi kokonaisdipolimomentti häviää [3].

Ferrosähköisen nestekiteen kierteinen rakenne, on mahdollista poistaa ja silti säilyttää ferrosähköiset ominaisuudet. Helpoin tapa on sekoittaa kaksi vastakkaisesti kiertynyttä nestekide materiaalia, jolloin kierre purkautuu. Kierre saadaan hävitettyä myös pintavoimien avulla, jolloin puhutaan pintastabiloidusta (surface-stabilized) rakenteesta [6]. Ohut ferrosähköinen materiaali asetetaan kahden lasilevyn väliin. Pintavuorovaikutus materiaalin ja lasilevyjen välillä estää molekyylin kartiomaisen prekessoinnin ja molekyyli voi asettua vain energeettisesti kahteen kulmaan  $\pm\psi$  [7].

Ferrosähköisen nestekiteen alkuorientointi on vaikea toteuttaa, verrattuna kiertonemaattiseen nestekiteeseen. Ensimmäiseksi orientoidaan smektinen A-faasi, jonka lämpötila nostetaan yli ferrosähköisen faasin stabiilin tilan ja sitten jäädytetään tarvittavaan smektiseen muotoon. Molekyylit asettuvat samansuuntaisesti lasin kiillotusuurteiden mukaan [6].

Ferrosähköisen nestekiteen molekyylien järjestäytymiseen voidaan vaikuttaa sähkökentän polaarisuudella. Kentän vaikutuksessa molekyylien suuntavektorin suunta riippuu kentän merkistä. Esimerkiksi suuntavektori kallistuu oikealle kulmaan  $\psi$  kerroksen normaaliin nähden tietyllä kentän suunnalla. Kun kentän suunta käännetään, molekyylit asettuvat niin, että suuntavektori kallistuu vasemmalle kulmaan  $-\psi$ . Molekyylien polaarisuus-riippuvuus järjestäytymistä voidaan käyttää toteuttamaan elektro-optinen ilmiö. Nestekide asetetaan ristikkäisten polarisaattorien väliin. Toisella kentän suunnalla, jolla suuntavektori on samansuuntainen kuin polarisaattorin akseli, valo sammuu rakenteeseen ja toisella merkillä valo pääsee läpi rakenteen. Kirkkaan

tilan intensiteetti on

$$I = I_0 \sin^2 4\psi \sin \frac{\pi \Delta n d^2}{\lambda}, \quad (3.4)$$

missä  $\Delta n$  on taitekertoimen anisotropia,  $d$  kiteen paksuus,  $\lambda$  valon aallonpituus ja  $\psi$  kallistuskulma [6].

Käyttämällä eri kallistuskulmia, nestekidekerroksen paksuuksia, polarisaattoreita, heijastimia ja aaltolevyjä, voidaan toteuttaa eri ominaisuuksia omaavia ferrosähköisiä laitteita [5].

## 4.1 Sähköinen osoitus

Nestekidenäytöissä käytetään sekä sähköistä, että optista osoitusta. Pienissä näytöissä käytetään suoraa osoitusta, jolloin jokaiseen kuvaelementtiin tulee johdin ja toisena elektrodina on näytön taustalevy. Kuvapisteiden lisääntyessä johdinten määrä kasvaa. Jos suorakaiteen muotoisessa näytössä on  $N \times M$  kuvaelementtiä, rivijohtimia on  $N$  kpl ja sarakejohtimia  $M$  kpl, niin tarvittavien johtimien määrä on  $N \times M$  kpl. Johdinten määrää voidaan pienentää käyttämällä matriisiosoitusta eli multipleksoivaa osoitusta, jolloin johtimien määrä on  $N + M$  kpl [2].

### 4.1.1 Multipleksoiva osoitus

Luonnollisessa multipleksoinnissa ei käytetä muistielementtejä. Multipleksointi alentaa muistittoman kuvapinnan toimintasuhdetta verrattuna suoraan osoitukseen, koska kutakin kuvaelementtiä ohjataan vain tietty aika, jolloin keskimääräinen kirkkaus ja kontrasti pienenee. Televisiokuvan muodostuksessa osoitettaessa yhtä riviä ja sen yhtä elementtiä kerrallaan toimintasuhte on vain  $1/NM$ . Toimintasuhteen parantamiseksi käytetään ohjausta, jossa ohjataan yhtä riviä kerrallaan, mutta myös kaikkia rivin kuvaelementtejä yhtä aikaa sarakejohtimien video- tai datasiignaaleilla. Tällöin toimintasuhte eli multipleksointisuhte on  $1/N$  [2].

Todellisessa matriisinestekidepaneelissa ei-toivotut jännitteet vaikuttavat ei-valittuihin kuvaelementteihin ja nämä elementit heikentävät kuvan laatua. Osoitettaessa yhtä kuvaelementtiä, kytketään jännite rivijohteeseen ja signaalijohteeseen, jolloin riittävän korkealla jännitteellä halutun kuvaelementin lisäksi viereiset ja ylä- ja alapuolella olevat kuvaelementit tulevat kirkkaiksi. Tätä ilmiötä kutsutaan ylikuulumiseksi, joka heikentää kuvan laatua ja kontrastisuuhdetta. Ylikuuluminen kasvaa lisättäessä rivi- ja sarakejohtimia. Va-

litun kuvaelementin sanotaan olevan täysin valitussa tilassa. Muut kirkkaat elementit ovat puoliksi valitussa tilassa ja tummat elementit ei-valitussa tilassa [3].

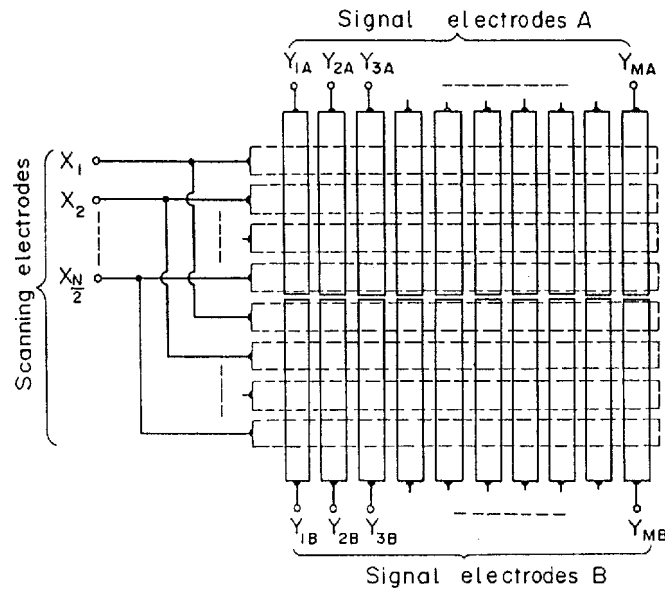
Ylikuulumista voidaan vähentää ja kontrastisuhdetta parantaa käyttämällä amplitudiselektiivistä osoitusmuotoa (amplitude selective addressing scheme). Tässä muodossa valittujen elementtien elektrodeille on kytketty koko jännite ja valitsemattomien elementtien elektrodeille bias-jännitteet. Jännitteet on valittu siten, että valitun kuvaelementin käyttöjännitteen  $V_0$  tehollinen arvo ylittää kynnsarvon ja valitsemattoman kuvaelementin jännitteen tehollinen arvo on yhtä suuri tai pienempi kuin kynnsarvo. Yleisesti käytetään  $\frac{1}{3}V_0$  bias-jännitettä. Kuvan kontrastisuhde, joka on valitun ja ei-valitun elementin kirkkauden suhde, on nyt suurempi, koska jännite-ero on tarpeeksi suuri erottamaan nämä kaksi tilaa [3].

Matriisi LCD-paneelien elektrodien ohjaamiseen käytetään MOS-siirtoporttia ja päätejärjestelmää. Matriisi LCD:n kontrastisuhde paranee, kun rivijohtimien määrää vähennetään. Kun kuvan laatu taas paranee lisäämällä kuvaelementtejä, jolloin tarvitaan lisää rivijohtimia. Pulman ratkaisuun on kehitetty menetelmä, jossa lisätään kuvarivejä mutta ei rivijohtimia. Jakamalla signaalelektrodimatriisi kahteen osaan, jolloin kussakin osassa on  $N/2$  rivijohdinta ja  $M$  signaalijohdinta (Kuva 4.1). Samalla rivisignaalilla ohjataan samanaikaisesti kahta rivijohdinta. Ylä- ja alaosa ohjataan toisistaan riippumatta ja samanaikaisesti eri signaali-ohjaimilla. Näyttöä kutsutaan jae-tuksi signaalelektrodimatriisi LCD:ksi (divided signal electrode type matrix LCD) [3].

Rivijohtimien määrää voidaan vähentää muillakin tavoin. Kahta kuvaelementtiriviä voidaan ohjata yhdellä rivijohtimella. Tähän perustuvia näyttötyyppejä ovat kaksoismatriisi (double matrix LCD) ja käänteinen kaksoismatriisi LCD (reversed type double matrix LCD). Nämä näytöt ohjataan kaksi riviä kerrallaan, jolloin signaalijännitteet syötetään kuvaelementtien kahteen riviin samanaikaisesti, kun yksi rivielektrodi on valittu. Käänteisen neliöllisen matriisi LCD:n (reversed quad matrix LCD) neljää kuvaelementtiriviä ohjataan yhdellä rivijohtimella. Näistä tyypeistä on valmistettu nestekide TV:ta, joiden nestekidemateriaalina on käytetty kiertonemaattista ainetta [3].

Kaksitaajuusosoituksessa (two-frequency driving scheme) jatkuva bias-jännitteen vaikutus ei-valittuun kuvaelementtiin rajoittaa kontrastisuhdetta varsinkin suurilla näytöillä, koska valitun kuvaelementin signaalin käyttösuhte vähenee rivijohtimien kasvaessa. Tämä ongelma ratkaistaan sopivalla bias-jännitteellä, joka aiheuttaa nestekidemolekyyleille negatiivisen sähkömomentin. Permittiivisyyden taajuusriippuvuutta voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. Permittiivinen anisotropia muuttuu positiivisesta negatiiviseksi taa-





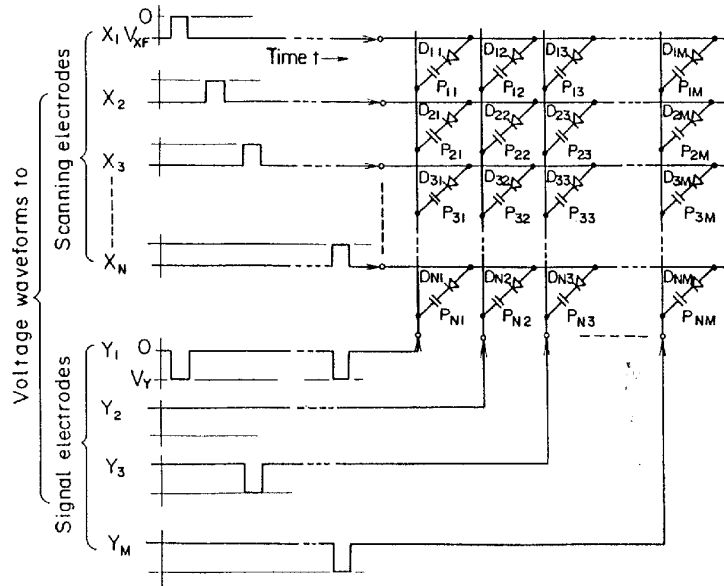
**Kuva 4.1:** Jaettu signaalelektrodimatriisi LCD.  $X$ :t ovat rivijohtimet,  $Y_{MA}$ :t ja  $Y_{MB}$ :t ovat  $A$ - ja  $B$ -osan signaalihohtimet [3].

juuden kasvaessa. Kaksitaajuusmatriisi LCD:ssä rajataajuuden alittavalla vaihtovirralla käännetään molekyylit sähkökentän suuntaiseksi, kun taas rajataajuuden ylittävällä vaihtovirralla molekyylit asettuvat kohtisuoraan kenttää vastaan [3].

Kaksitaajuusosoituksen matalataajuusvalinnassa (two-frequency driving scheme using low frequency selection) kuvaelementin valitut ja ei-valitut tilat voidaan määrätä matalataajuisien jännitteiden jaksolla, jotka on syötetty rivi- ja signaalihohtimiin. Hyvän kontrastisuhteen saavuttamiseksi monirivisillä näytöillä ei-valitun kuvaelementin taustakohina eliminoidaan korkeataajuisella jännitteellä. Kaksitaajuusosoituksen korkeataajuusvalinnassa (two-frequency driving scheme using high frequency selection) kuvaelementin valitut ja ei-valitut tilat voidaan määrätä korkeataajuisien jännitteiden jaksolla, joilla osoitetaan rivi- ja signaalihohtimia [3].

#### 4.1.2 Diodisoitus

Tavanomaisella matriisi LCD-paneelilla, jolla ei ole muistiominaisuutta, on perusrajoitukset rivijohtimien määrälle. Rajoituksen voi ylittää käyttämällä ohjauksessa ei-lineaarisia piirikomponentteja rivi- ja signaalihohtimien leik-



**Kuva 4.2:** Diodimatriisi osoitetun nestekidenäytön kaavakuva ja käyttöjännitteen aaltomuodot.  $X_N$  ovat rivijohtimet,  $Y_M$  ovat signaalijohtimet,  $D_{NM}$  ja  $P_{NM}$  ovat rivi- ja signaalijohtimien risteyksissä sijaitsevat diodit ja kondensaattorit [3].

kauskohtassa. Samalla terävöitetään kuvaelementin kynnsominaisuuksia [3].

Diodiosoituksessa kuvaelementin kanssa sarjaan kytketyn diodin epälineaarisilla ominaisuuksilla kumotaan nestekide-elementin symmetriset ja kaksisuuntaiset ominaisuudet, jotka rajoittavat rivijohtimien määrää. Diodimatriisilla osoitettu LCD on esitetty kuvassa 4.2 [3].

Valittuihin kuvaelementteihin kytketään jännite  $(V_Y - V_b)$ , missä  $V_b$  on diodin vaimentama esijännite. Kun kuvaelementti on valittu, sen jännite  $V_{LC(t)}$  kasvaa nopeasti  $(V_Y - V_b)$ :n. Kuva on välkkymätön, jos jännitepulslien intervalli on pienempi kuin nestekiteen permittiivinen virkistysaikavakio  $\tau_{LC}$ .  $\tau_{LC}$  on aika, jossa  $V_{LC}$  häviää rivijohtimen kytkeydyttyä irti. Keskimääräinen valon läpäisy on hyvin alhainen, koska läpäisy huononee heti, kun valinta jännite on poistettu. Kuvaelementin varaus pitäisi purkautua ennenkuin se on valittu uudelleen, jotta saavutetaan tahraton kuva [3].

Kaksoiskynnys muodon LCD:ssä (double threshold scheme LCD) käytetään kahta terminaalilaitetta, jotka saavat aikaan asetus- ja nollausfunktiot

kullekin kuvaelementille sopivilla signaalipulsseilla rivijohdinajureista. Kuvaelementin osoitus tapahtuu samanaikaisesti syöttämällä rivijännitepulssi rivijohtimille ja signaalijännitepulssi signaalijohtimille. Kaksoiskynnys muodon LCD:ssä käytetään ohutkalvo amorfista pii PIN-diodimatriisi (thin film amorphous silicon (a-Si) PIN diode matrix) rakennetta. Kuvaelementin kaksi diodia muodostaa diodirenkaan siten, että ne on kytketty toisiinsa vastakaisista navoista eli muodostuu yksisuuntainen rengasrakenne. Tästä rakenteesta on valmistettu TV:ta [3].

Korkeasti epälineaarisia virta-jänniteominaisuuksia voidaan saavuttaa tanaaalipentaoksidi ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) kerroksella, jota käytetään Ta-rivijohtimen ympäröivänä päällysteenä. Tätä MIM (Metal-Insulator-Metal) kaksoiskynnysdiodirakennetta, joka on kytketty kuvaelementin kanssa sarjaan, käytetään LCD:n kynnysohjaukseen. MIM-ohjattu matriisi LCD on valmistettu käyttämällä nestekidemateriaalina kiertonemaattista faasia [3].

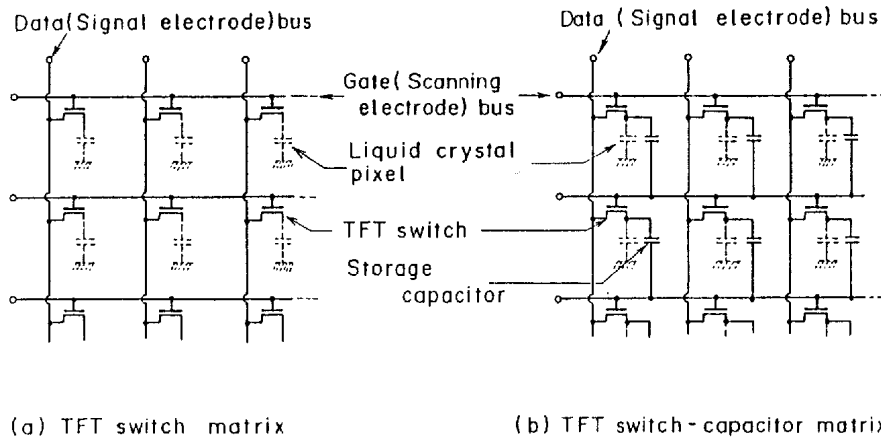
#### 4.1.3 Varistoriosoitus

Varistoriosoituksen keraamiset metallioksidivaristorit valmistetaan sintraamalla sinkkioksidijauhe ( $\text{ZnO}$ ) koboltti- tai antimonioksidin kanssa. Sähkökentässä tällä aineella on havaittu epälineaarisia ominaisuuksia. Varistorilla on, epälineaarisen resistanssin lisäksi, kapasitanssi  $C_{VAR}$ . Varistori ja nestekidekenno on kytketty sarjaan. Kun jännite ylittää kynnysjännitteen ja sen jälkeen jännite alenee, varistori ei enää johda ja nestekidekenno pitää jännitteen sekä valon läpäisytilan. Tällöin kenno on ON-tilassa. Kytkennällä on muisti, jonka säilymisaika riippuu kennon resistiivisyydestä. Resistiivisyys aiheuttaa varauksen purkautumisen kennosta. Varistorimatriisiohjattujen tasomuodon vieras-isäntä-nestekidenäyttöjen suorituskyky riippuu suurimmaksi osin varistorimateriaalin ominaisuuksista [3].

#### 4.1.4 Transistoriosoitus

Matriisi LCD:n paras osoitustapa, jossa osoitetaan kuvaelementtiä riippumatta muista ja pidetään kuvaelementin jännite vakiona koko kuvan kestoajan, saavutetaan jokaisen kuvaelementin omalla kytkimellä, kuten transistorilla [3].

Kuvaelementin optisten ominaisuuksien ohjaamiseen käytetään ohutkalvotransistoreita (thin film transistor, TFT). TFT:n on sijoitettu rivi- ja signaalijohdinväylän risteykseen kuvaelementin reunaan. Transistorin hila kytketään rivijohdinväylään, emitteri signaalijohtimen väylään ja kollektori nestekidekennon toiseen levyyn. Jos kuvaelementin kapasitanssi ei ole riittävän suuri varastoimaan varausta koko kuvan kestoajan, lisätään muistikondensaattori. Kytkennät on esitetty kuvassa 4.3 [3].

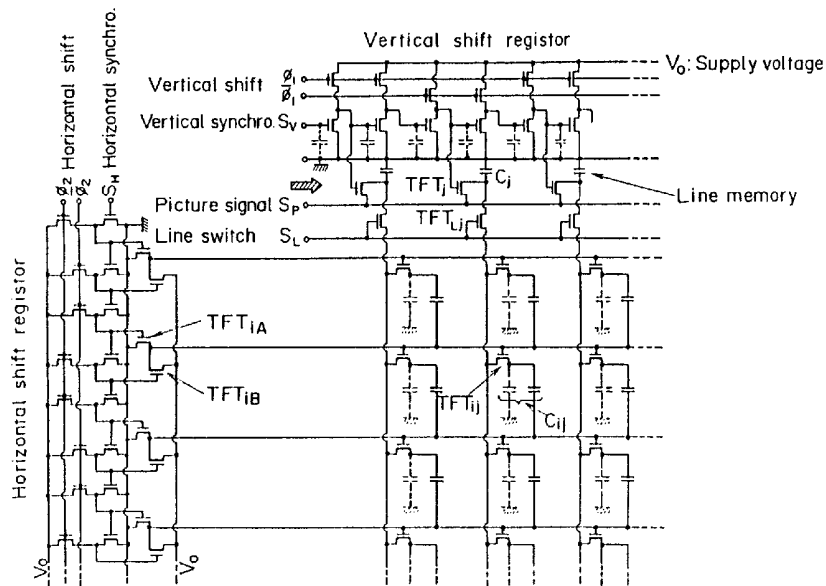


**Kuva 4.3:** TFT-matriisin (a) ja TFT-kondensaattorimatriisin (b) kytkennät [3].

Kadmium-seleeni (CdSe) TFT valmistetaan puolijohdeteknologian valmistusprosesseilla, jotka sisältävät lukuisia eri vaiheita. CdSe TFT-osoitettu matriisi LCD-paneelin ulkoinen osoituspiiri sisältää kolme osaa: kytkin osoitetun matriisi LCD:n, rivijohdinväylän ja signaalijohdinväylän ajopiirit (Kuva 4.4). Koska ajopiirit sisältävät myös TFT:ta, niin ne voidaan valmistaa samalle lasilevyille [3].

Rivijohdinväylän ajopiiri sisältää rivijohdinväyläajurit ja vaakasuoran siirtorekisterin (horizontal shift register) eli kaksivaihe N-tila siirtorekisterin (two-phase N-stage shift register). Rekisteri siirtää ON-OFF-signaalin ensimmäisestä tilasta viimeiseen tilaan synkronoinnissa kahden vaakasuoran vaiheen siirtopulssin (phase horizontal shift pulse)  $\phi_2$  ja  $\bar{\phi}_2$  kanssa. Nyt  $TFT_{iA}$  on kiinni ja  $TFT_{iB}$  on auki, joten lähdejännite  $V_0$  on kytketty ( $i$ ):nteen rivijohdinväylään.  $TFT_{ij}$ , jotka on kytketty ( $i$ ):nteen väylään, on ajettu ON-tilaan. Muut matriisiosan TFT:t ovat OFF-tilassa ja rivijohdinväylät maapotentiaalissa. Valittu rivijohdinväylä on siirtynyt ensimmäisestä viimeiseen, kun vaakasuora siirtopulssi on kytketty siirtorekisteriin [3].

Signaalijohdinajopiiri sisältää pystysuoran siirtorekisterin (vertical shift register), eli kaksivaihe M-tila siirtorekisterin (two-phase M-stage shift register), kuvajuovamuistin, juovakytkimet ja signaalijohdinväyläajurit. Rekisterin toimintaa ohjataan pystysuorilla siirtopulsseilla (vertical shift pulse),  $\phi_1$  ja  $\bar{\phi}_1$ , ja vain yksi sen tiloista voi tuottaa positiivisen pulssin kuvasignaalin näytteenottotransistorille  $TFT_j$ , jolloin se on ON-tilassa ja muut OFF-tilassa. Tämä tila on siirretty vasemmalta oikealle synkronisaatioissa  $\phi_1$  ja



**Kuva 4.4:** TFT-kytkinmatriisi osoitetun nestekide TV:n piirikaavio [3].

$\bar{\phi}_1$  kanssa. Kuvajuovamuisti sisältää  $M$  kpl  $TFT_j$  ja muistikondensaattoreita  $C_j$ .  $TFT_j$ :n kollektorit on kytketty kuvasignaaliin. Toiminnan aikana syöttö amplitudimoduloin kuvasignaali  $S_p$  on samanaikaisesti kytketty yksijuovamuistin  $TFT_j$  emittereille.  $TFT_j$ :n emitteri-kollektoriväli on suljettu yksitellen vasemmalta oikealle synkronisaatiossa pystysuoran siirtorekisterin signaalien kanssa, syöttösignaaleista on otettu näytteet järjestyksessä ja yhtä suurilla aikaväleillä. Signaalit on muunnettu vastaaviksi analogisiksi signaaleiksi ja varastoitu kuvajuovamuistin kondensaattoreihin  $C_j$  [3].

$C_j$ :t puretaan signaalijohdinväyliin samanaikaisesti valitsemalla kaikki juovakytkimet  $TFT_{Lj}$ . Toiminta on synkronisoitu juovakytkinpulssin  $S_L$  kanssa. Jotta voidaan osoittaa peräkkäin kuvaelementtien rivejä, rivijohdinväylän  $TFT_{iA}$ :n emitteri-kollektori väli on aukaistu ja  $TFT_{iB}$  on suljettu samanaikaisesti yksitellen ylhäältä alas synkronoinnissa vaakasuoran siirtorekisterin signaalien kanssa [3].

Kuvaelementin porttitransistori  $TFT_{ij}$  päästää elementtikondensaattorin  $C_{ij}$  varautumaan.  $C_{ij}$  sisältää nestekiteen ja muistikondensaattorin kapasitanssin.  $C_j$  purkaa varauksensa  $C_{ij}$ , kun  $TFT_{ij}$  on auki. Jos signaalijohtimen jännitepulssin amplitudi on suurempi kuin  $C_{ij}$ :n varaus, niin lisävaraus kasvattaa sen jännitettä. Muiden rivien portti TFT:t pysyvät maanpotentiaa-

lissa ja siten OFF-tilassa, jolloin kuvaelementin kondensaattoriin varastoitu-  
nut harmaasävyyn informaatio pysyy muuttumattomana seuraavan kuvajakson  
[3].

Aikamuuttuva analoginen kuvasignaali on muutettu  $M$  näytteiseksi dis-  
kreetiksi yksijuovasisignaalksi.  $N$  kpl yksijuovasisignaalia on syötetty  $N \times M$ -  
matriisin kuvaelementteihin muodostamaan yksi kuvasignaali. Toistettaessa  
edellinen toiminta saadaan kuva päivitettyä joka jaksossa [3].

CdSe TFT-matriisiosoitettuja nestekide TV:ta on valmistettu kiertonemaattisesta materiaalista. Näytöllä voidaan näyttää liikkuvia kuvia, koska näytön vasteaika on lyhyempi kuin 50 ms. Näytöllä on suhteellisen hyvä kontrasti, johtuen kuvaelementin kondensaattorin varauksen varastointiominaisuudesta [3].

CdSe:llä on stökiometrisiä ongelmia, jotka voidaan ratkaista käyttämällä sisäisenä puolijohdemateriaalina telluuria (Te). Koska Te:lla on korkea varaustenkuljettajien liikkuvuus, jopa ohuissa kalvoissa, riittävän nopea vaste voidaan saavuttaa. Te TFT-matriisiosoitettulla kiertonemaattisella LCD:llä on hyvä kontrastisuhte, mutta huono stabiilisuus [3].

Pii MOSFET-transistoria (metal-on-oxide field effect transistor) käytetään osoituselementtinä dynaamisen sironnan ja tasomuodon vieras-isäntä-näytöissä, koska piilevy on läpinäkymätön. MOSFET-transistorimatriisiosoitettun LCD:n kuvaelementin muistikondensaattori on kytketty rinnan. MOSFET-transistoreilla osoitus tapahtuu rivi kerrallaan. Transistoreiden riviportit aukaistaan peräkkäin ylhäältä alas rivijohdin väyläajureiden pulseilla ja sopivat kuvasignaalit on samanaikaisesti syötetty MOSFET-transistoreiden emittereille. Osoituksessa kuvaelementin muistikondensaattori on varautunut tasolle, joka on verrannollinen MOSFET:n läpäisseen analogisen kuvainformaatio-signaaliin [3].

Muistikondensaattorin tehtävä on lisätä nestekide-elementin perimitiivistä virkistysaika, kunnes se on huomattavasti suurempi kuin kuvan kesto-aika. Tällä vähennetään saturoitunutta kirkkautta ja kirkkaus pysyy vakiona koko kuvan kestoajan [3].

Eri puolijohdeteknologian valmistusmenetelmillä saadaan ominaisuuksiltaan erilaisia näyttöihin sopivia MOSFET:ia. MOSFET-matriisiosoitettulla nestekide TV:lla on korkea kontrastisuhte, mutta katselukulma ei ole tarpeeksi suuri. Dynaamisen sironnan näytössä osoitetaan rivi kerrallaan, kun taas vieras-isäntä-näytöissä piste kerrallaan [3].

Amorfisen piikalvon (amorphous silicon, a-Si) valmistusmenetelmillä on mahdollista tehdä suurialaisia kytkinmatriiseja ohuelle kalvolle. Ohuella a-Si-kalvolla varausten liikkuvuus on huonoa, mutta ongelmaa voidaan pienentää a-Si-kalvon hydraamisella. Hydrattua a-Si-kalvoa merkitään a-Si:H. a-Si:H TFT-kytkin voidaan toteuttaa erilaisilla puolijohdeteknologian valmistusme-

netelmillä [3].

Varsinaisissa LCD:ssä käytetään nemaattista nestekidemateriaalia, johon on liuotettu väriainetta. Näiden näyttöjen kontrastisuhte ei ole riittävä tavallisten kuvien näyttämiseen ja vasteaika ei ole riittävä TV:n toimintanopeuteen nähden. Kirkkaassa valossa fotoneita osuu TFT:n ja aiheuttavat virran, joka vähentää OFF-tilan resistanssia. Valojohtavuus huonontaa kuvaelementin muistiominaisuuksia [3].

a-Si:H TFT-osoitetussa värimatriisi LCD:ssä värit saadaan aikaiseksi mosaikkimaisilla monivärisuodattimilla. Värimatriisin piirit on lisätty tavalliseen monokromaattisen mustavalkotelevision näyttöpiireihin, jolla erotetaan kolme värisignaalin komponenttia. Erotetut värisignaalit syötetään peräkkäin vastaaville kuvaelementtiryhmille peräkkäisillä jaksoilla. Tällä näytöllä ei pystytä tavallisen väritelevision väriasteikolle [3].

FET:n varausten liikkuvuutta voidaan lisätä korvaamalla a-Si-kerros monikiteisellä piillä (polycrystalline silicon, p-Si), jolloin kuljettajien keskimääräinen törmäysväli lisääntyy. TFT:n puolijohdekanavan valmistukseen käytetään monenlaisia puolijohdeteknologian menetelmiä, jotta saavutettaisiin mahdollisimman suuri hilan pinta-ala. Suurin pinta-ala saavutetaan molekyulaarisella sädekerrostamisella (molekular beam deposition, MBD). MBD p-Si TFT-matriisi osoitetussa LCD:ssä osoitus tapahtuu rivi kerrallaan ulkoisella CMOS-ajopiirillä [3].

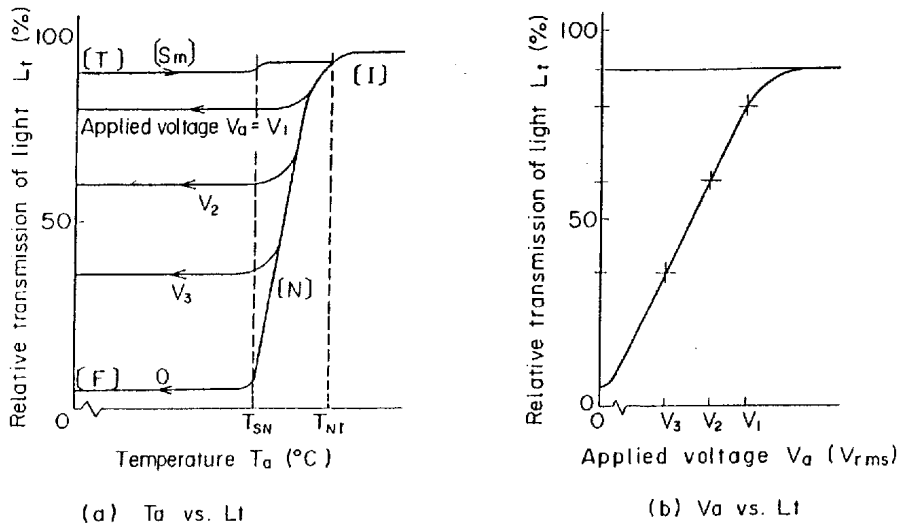
Paras FET:n varausten liikkuvuus saavutetaan p-Si-ohutkalvokerroksella, joka on melkein sama kuin yksikiteisellä piikerroksella, mutta a-Si-ohutkalvokerroksella liikkuvuus on jo paljon huonompi. Liikkuvuus on p-Si:llä riittävä toimiakseen TV-videosignaalien kanssa. a-Si TFT sopii paremmin matriisi LCD:n kuvaelementin osoitukseen ja p-Si TFT ohjaamaan ajosignaaleita sekä rivijohdinväyliä [3].

## 4.2 Optinen osoitus

### 4.2.1 Laserosoitus

Positiivisen anisotropian ja homeotrooppisen alkuorientoinnin omaava smektinen A-nestekidemolekyyli-rakenne on läpinäkyvä. Molekyyli-rakenne hajoaa ja materiaali muuttuu isotrooppiseksi nesteeksi, kun se kuumennetaan suhteellisen voimakkaalla lasersäteellä yli lämpötilan, jossa smektinen faasi muuttuu nemaattiseksi. Kun aine jäädytetään, siitä tulee samea ja läpinäkymätön. Jos jäädytyksessä käytetään tarpeeksi suurta jännitettä, aine palaa alkuperäiseen läpinäkyvään tilaan [3].

Kuvat voidaan kirjoittaa nestekidekerrokseen lasersäteellä, joka voi liikua koko nestekidenäytön alueella  $xy$ -tasossa, ja käyttöjännite on ohjattu



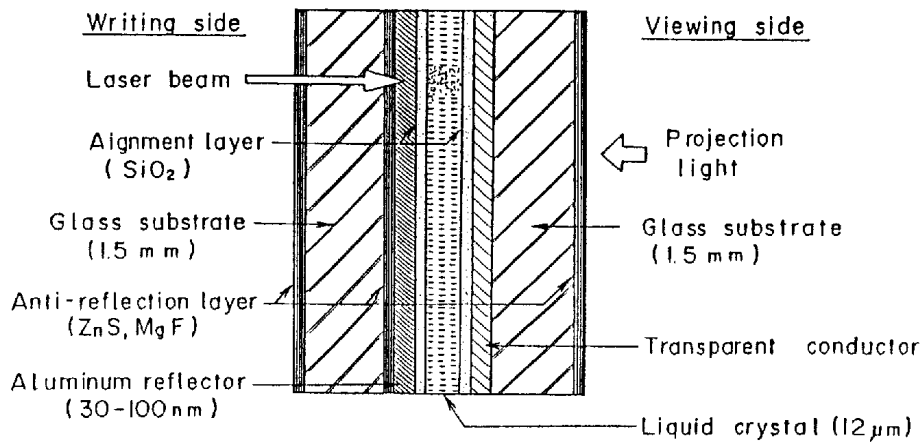
**Kuva 4.5:** Smektisen nestekidekennon suhteellinen läpäisy  $L_t$  lämpötilan  $T_a$  (a) ja käyttöjännitteen  $V_a$  (b) funktiona. Kolmella jännitteen arvolla,  $V_1$ ,  $V_2$  ja  $V_3$ , saadaan erilainen suhteellinen läpäisy.  $T_{SN}$  ja  $T_{NI}$  ovat lämpötilat, jossa smektinen A-faasi muuttuu nemaattiseksi faasiksi ja nemaattinen faasi isotrooppiseksi nesteeksi, ja päinvastoin [3].

kuvasignaalilla. Kuvan harmaatasot saadaan näytettyä, jos käyttöjännite on amplitudimoduloitu, sillä aikaa kun kenno jäähdytetään. Kuvassa 4.5 on esitetty smektisen A-nestekidekennon termiset ja elektro-optiset ominaisuudet [3].

Laserisoitetun nestekidevalokytkimen (liquid crystal light valve, LCLV) poikkileikkaus on esitetty kuvassa 4.6. Kytkimen elektrodi on tavallisesti ohut alumiiniheijastuskerros. Alumiinikerros absorboi lasersäteen energian, kun säde osuu kennoon oikealta puolelta. Tämä kohta kerroksesta kuumentuu ja lähellä olevan nestekidemateriaalin lämpötila nousee. Kohdan optinen tila määrätään jännitteellä, joka on kytketty elektrodien välille. Kuva nestekidekerrokseen on siis kirjoitettu lasersäteellä ja käyttöjännitteellä. Alumiinikerrosta käytetään myös heijastamaan vasemmalta tuleva valo. Projektiovalon intensiteettiä moduloidaan nestekiteen kuvalla, joka on kirjoitettu lasersäteellä. Heijastusta ehkäisevillä levyillä parannetaan kirjoitussäteen ja kennosta heijastuvan näkyvän valon intensiteettiä [3].

Kuva nestekidekennoon voidaan kirjoittaa myös ilman käyttöjännitettä





**Kuva 4.6:** Laserosoitetun LCLV:n poikkileikkaus [3].

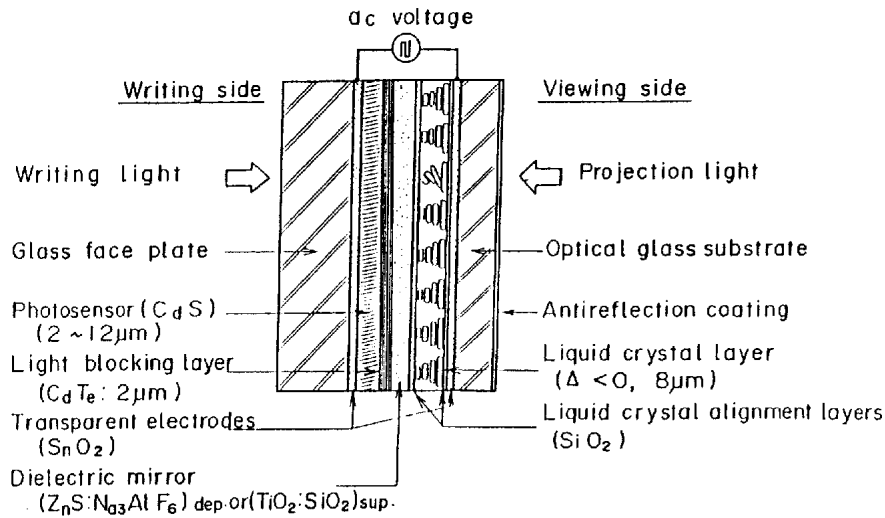
muuttamalla lasersäteen intensiteettiä. Kuvan kontrastisuhde on lähes verrannollinen lasersäteen energiatiheyteen [3].

Laserosoitettuja LCLV:tä käytetään heijastuslaitteissa, joten käytettäviltä laitteilta vaaditaan tiettyjä ominaisuuksia. Nestekidekennon mitat eivät saa muuttua lämpötilan muuttuessa, muuten esiintyy kuvassa vääristymiä. Lasersäteen on liikuttava mikrometrin tarkkuudella pinnan pyyhkäisyssä. Kuvan heijastamiseen tarvitaan korkean suorituskyvyn omaavia optisia systeemeitä, jotka sisältävät suuri apertuurisia linsejä [3].

#### 4.2.2 Valo-osoitus

Valo-osoituksessa voidaan osoittaa kaikki näytön elementit samanaikaisesti, kun sähköisessä osoituksessa ainoastaan rivi kerrallaan [8]. Kuvassa 4.7 on esitetty heijastusmuotoisen  $45^\circ$  kiertonemaattisen LCLV:n kerrosrakente. Rakenteessa on valojohdekerros, joka moduloi nestekidekerroksen heijastuskerrointa kirjoitusvalolla valojohdekerrokseen kirjoitettujen kuvien mukaisesti. Valoherkkänä kerroksena käytetään kadmiumsulfidia (CdS). Sinkkisulfidi (ZnS) permittiivinen peili ja kadmium telluuri (CdTe) sulkukerros erottavat valojohdekerroksen projektiovalon säteestä, jolloin pystytään samanaikaisesti kirjoittamaan ja lukemaan laiteella ilman, että tarvitaan huomioida valokeilojen spektriä. Nestekidemolekyylien suuntavektori kiertää  $45^\circ$  kuljettaessa kerroksen läpi. Tätä kutsutaan hybridikenttäefekti muodoksi (hybrid field effect, HFE) [3].

Lineaarisesti polaroituneen valon polarisaatiotaso kääntyy mennessään läpi nestekidekerroksen. Valojohdekerroksen impedanssi on korkeampi kuin nestekidekerroksen, kun valojohde ei ole valaistu ja impedanssi on matalampi,



Kuva 4.7: HFE-muodon LCLV kerrosrakenne [3].

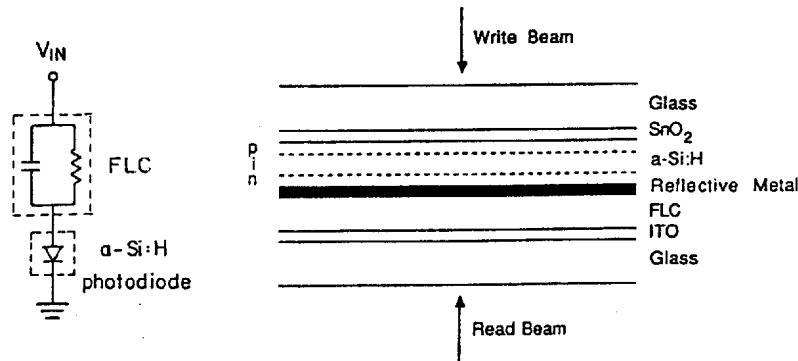
kun valojohde on valaistu. Kirjoitusvalon määrällä muutetaan nestekidekerroksen AC-käyttöjännitettä ja valojohdekerroksen impedanssia. Positiivisesti anisotrooppisen nestekidekerroksen molekyylit kääntyvät kohtisuoraan elektrodeja vastaan, kun tarpeeksi valoa osuu valojohdekerrokseen. Projektiovalosta heijastuu näkyvä valo, joka on intensiteettimoduloitu valojohdekerroksesta kirjoitetulla kuvalla [3].

HFE-muodon LCLV:n valojohdekerroksen yli on kytketty koko AC-käyttöjännite, kun siihen tulee valoa. Tätä tilaa pidetään OFF-tilana, koska nestekidekerrokseen ei ole kytketty jännitettä. Kun kirjoitusvalo osuu valojohdekerrokseen, sen impedanssi vähenee ja jännite kytkeytyy nestekidekerrokseen. Kenno on ON-tilassa [3].

Kerrokseen kirjoitettavan kuvan resoluutiota voidaan suurentaa lisäämällä valojohdekerroksen resistanssia ilman, että kuva laajenee. Impedanssia voidaan lisätä korvaamalla CdS-valojohdekerros ohuella korkearesistiivisellä yksikiteisellä piilevyllä [3].

Ferrosähköisillä nestekiteillä optisessa osoituksessa valojohdeena on käytetty vismuttipiiksidia (bismut silicon oxide, BSO) ja hydrattua amorfista piitä (hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H). a-Si:H-valojohdeella varustettujen ferrosähköisten nestekidekennojen etuna on se, että vasteajat ovat pienempiä verrattuna BSO-valojohdeella rakennettuihin ferrosähköisiin nestekidekennoihin [8].

Kuvassa 4.8 on esitetty pintastabiloidun ferrosähköisen LCLV kerrosrakenne ja vastaava piirikaavio. a-Si:H-valojohde on rakenteeltaan p-i-n-valo-



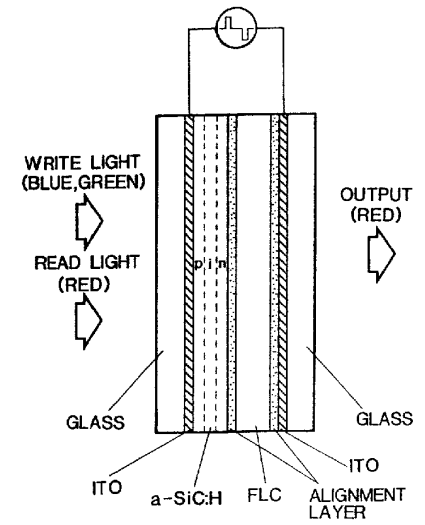
**Kuva 4.8:** a-Si:H valojhteella osoitetun heijastusmuotoisen ferrosähköisen nestekidekennon kerrosrakenne ja vastaava piirikaavio [8].

diodi. Kun valodiodi on myötäesijännitteessä, käyttöjännite alenee nestekiteen aktiiviselta alueelta. Nestekidemolekyylit asettuvat toiseen mahdolliseen tilaansa, jolloin myös optinen akseli asettuu samaan suuntaan. Kerrosrakenne on asetettu ristikkäisten polarisaattorien väliin, jolloin tässä tilassa lukuvalon intensiteetti on minimissä. Kirjoitusvalo ei vaikuta heijastuneeseen lukuvaloon tässä ns. poistojaksossa [9].

Kirjoitusjakso alkaa käyttöjännitteen polariteetin vaihtamisella, jolloin valodiodi on esto-esijännitteessä. Nestekiteeseen syötetään käyttöjännite, jonka suuruus on verrannollinen kirjoitusvalon intensiteettiin. Optinen akseli asettuu toiseen mahdolliseen asentoon, jolloin heijastunut lukuvalo läpäisee analyysointin [9].

Yksi uusimmista valojhteista on hydrattu amorfinen piikarbidi (hydrogenated amorphous silicon carbide,  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ ), jolla on laajempi energiavyön aukko, korkeampi resistiivisyys ja alhaisempi permitiivisyys kuin a-Si:H:lla. Tämän vuoksi valojohdekerroksesta saadaan ohuempi, jolloin se läpäisee paremmin näkyvää valoa.  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x$  valojohdin absorboi sinistä ja vihreää valoa ja on läpinäkyvä punaiselle valolle. Tämän vuoksi kirjoitusvalona käytetään sinistä ja vihreää valoa ja lukuvalona systeemin läpäisevää punaista valoa. Koska  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x$  ferrosähköisessä nestekidekennossa ei ole heijastinosaa, kennon kirjoitus ja luku suoritetaan samalta puolelta, kuten kuvassa 4.9 on esitetty [10].

Positiivisella jännitteellä  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x$  valojohdimella on myötäesijännite ja nestekidekerroksen käyttöjännite alenee, jolloin nestekide on OFF-tilassa. OFF-tila ei riipu kirjoitusvalosta. Negatiivisella jännitteellä valojohdin on



**Kuva 4.9:**  $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x$  ferrosähköinen valo-osoitettu nestekidekenno [10].

estoesijännitteessä. Valojohtimen käyttöjännite alenee, koska sen impedanssi on suurempi kuin nestekiteen ja nestekide pysyy OFF-tilassa. Kun systeemiä valaistaa kirjoitusvalolla valojohteen impedanssi pienenee ja jännite kasvaa nestekiteessä lähelle käyttöjännitettä. Nestekide kytkeytyy ON-tilaan, jossa se pysyy niin kauan kuin tulee seuraava positiivinen pulssi. Muistijakson ajan lukuvalo valaisee systeemiä ja havaitaan läpi mennyt ulostulokuva [10].

Kun valoallon yhtä parametria, amplitudia, vaihetta, suuntaa tai taajuutta, on muutettu ajan suhteen, sanotaan aallon olevan moduloitu ja muutoksen aiheuttanutta laitetta kutsutaan modulaattoriksi. Optista aaltoa moduloidaan muuttamalla aineen, jonka läpi aalto etenee, optisia ominaisuuksia. Aineen optisia ominaisuuksia voidaan muuttaa käyttämällä mekaanista kuormitusta, sähkö- tai magneettikenttää [4].

Sähkökentän vaikutuksessa aineen elektronit, ionit ja dipolit orientoituvat uudelleen, jolloin syntyy sähköinen polarisaatio. Indusoitunut polarisaatio aiheuttaa anisotropiaa, joka synnyttää kahtaistaitavuutta. Valon kulkiessa aineen läpi, jonka kahtaistaitavuuteen voidaan vaikuttaa sähkökentällä, sen optinen polarisaatio muuttuu [4].

## 5.1 Kaksiulotteiset paikkamodulaattorit

Paikkamodulaattoreilla (spatial light modulator, SLM) voidaan moduloida optisen aaltorintaman poikkileikkauksen ominaisuuksia: amplitudia (intensiiteettiä), vaihetta tai polarisaatiota. SLM:lla on ominaisuus moduloida kaksiulotteista aaltorintamaa samanaikaisesti, jota ominaisuutta ei ole elektronikassa [11].

SLM:lla voidaan suorittaa analoginen kertominen ja summaus, signaalin muunnos, binäärinen kynnystys ja muistitoiminto. SLM:n ominaisuuksia voidaan soveltaa optisissa korrelaattoreissa ja matriisiprosessoreissa, digitaali-optisissa arkkitehtuureissa sekä näytöissä [11].

SLM:t jaetaan modulointimenetelmien mukaan mekaanisiin, magneettisiin, sähköisiin ja lämpö SLM:hin. Kukin menetelmän SLM:t jaetaan vielä modulointi muuttujan mukaan amplitudi, vaihe, polarisaatio ja taajuus SLM:hin. Nämä ovat joko sähköisesti tai optisesti osoitettuja [11].

## 5.2 Nestekidepaikkamodulaattori

Sähköisesti osoitettuja nestekidemodulaattoreita on kehitetty näyttömarkkinoille, kuten nestekide TV:hin ja videoprojektoreihin. Näitä kiertonemaattisia näyttöjä on joko matriisi tai TFT-aktiivimatriisi osoituksella. Näistä näytöistä saadaan paikkamodulaattoreita poistamalla diffuuserit ja korvaamalla huonot polarisaattorit sekä lasilevyt optisesti paremmilla. Viime aikoina on optisesti osoitettujen ferrosähköisten nestekiteiden käyttö lisääntynyt paikkamodulaattoreina, koska ne ovat toiminnaltaan nopeampia kuin sähköisesti osoitetut kiertonemaattiset nestekiteet [11].

### 5.2.1 Kiertonemaattinen nestekidepaikkamodulaattori

Kiertonemaattisen nestekide TV:n (liquid crystal TV, LCTV) suorituskykyä SLM:na on tutkittu paljon teoreettisesti ja kokeellisesti, mm. [12] [15] [17] [18] [19] [20] [21] [22], ja käytetty optisissa prosessointisovelluksissa, esim. [15] [23] [24], koska ne ovat helposti saatavissa ja suhteellisen halpoja. Nestekide on kahtaistaittava aine, joten nestekide TV:ta voidaan käyttää myös vaihemodulaattorina. Intensiteetti- ja vaihemodulointi riippuvat käyttöjännitteestä ja polarisaattorien suunnista. Kiertonemaattista LCTV ei voi käyttää täydellisenä intensiteetti- tai vaihemodulaattorina. Koherenttioptisessa prosessoinnissa moduloitaessa intensiteettiä myös vaihe muuttuu ja päinvastoin. Tämä asettaa laitteille suuria vaatimuksia [12].

Kiertonemaattinen nestekide on anisotrooppinen aine, jota voidaan käsitellä paikallisesti yksiakselisena kiteenä, jonka optinen akseli on molekyylien suuntainen. Kiertonemaattisessa nestekiteessä molekyylit kiertyvät asteittain, jolloin aine on epähomogeeninen. Se on paikallisesti yksiakselinen kite, jonka optinen akseli kiertyy [12].

Optisen systeemin, joka koostuu eri kulmissa toisiinsa nähden olevista elementeistä, kokonaisläpäisy lasketaan helposti käyttäen Jones-laskentaa. Se on  $2 \times 2$ -matriisimenetelmä, jossa kukin polarisaatiotila on esitetty kaksialkioisella vektorilla ja kukin elementti  $2 \times 2$ -matriisilla. Systeemin kokonaimatriisi saadaan kertomalla elementtien matriisit keskenään ja systeemin läpäisseen valon polarisaatiotila saadaan kertomalla kokonaimatriisi sisäänmenevän säteen sähkökenttävektorilla [13]. Oletetaan tilanne, jossa polaroitunut valonsäde menee kolmen optisen komponentin läpi. Merkitään optisten komponenttien matriisit  $M_1$ ,  $M_2$  ja  $M_3$  seuraavasti

$$M_1 = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ c_1 & d_1 \end{pmatrix}, M_2 = \begin{pmatrix} a_2 & b_2 \\ c_2 & d_2 \end{pmatrix} \text{ ja } M_3 = \begin{pmatrix} a_3 & b_3 \\ c_3 & d_3 \end{pmatrix}. \quad (5.1)$$

Merkitään sisäänmenevää Jones-vektoria  $\mathbf{J}$  ja ulostulevaa Jones-vektoria  $\mathbf{J}'$

seuraavasti

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} \text{ ja } \mathbf{J}' = \begin{pmatrix} A' \\ B' \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Jos sisäänmenevä Jones-vektori  $\mathbf{J}$  osuu ensimmäiseksi optiseen komponenttiin  $M_1$  ja ulostulon Jones-vektori  $\mathbf{J}'$  tulee ulos optisesta komponentista  $M_3$ , saadaan  $\mathbf{J}'$  laskettua tulona [14]

$$\mathbf{J}' = M_3 M_2 M_1 \mathbf{J}. \quad (5.3)$$

Valon liikkuessa kahtaistaittavassa kiteessä, se muodostuu kahden ominaisaallon lineaarisesta superpositiosta. Yksiakselisessa kiteessä ominaisaallot ovat ordinaari- ja ekstraordinaariaalto. Ominaisaaltojen polarisaatiosuunnat ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden ja niitä kutsutaan ”hitaaksi” ja ”nopeaksi” akseliksi [13].

Polarisaatiotilan muunnos tai siirros saadaan aikaan hidastuslevyllä (retardation plate, wave plate) ja vaihesiirtäjällä (phase shifter). Sopivalla hidastuslevyllä voidaan polarisaatiotila muuntaa toiseen polarisaatiotilaan. Jonesmatriisimenetelmässä oletetaan, että levyn pinnassa ei tapahdu heijastusta ja valo läpäisee häviöittä levypinnan. Käytännössä heijastusta tapahtuu. Kuvan 5.1 mukaan hidastuslevyyn tulevan valon polarisaatiotila määritellään Jones-vektorilla

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix}, \quad (5.4)$$

missä  $V_x$  ja  $V_y$  on kompleksilukuja sekä  $x$  ja  $y$  ovat laboratorioakselit. Hidastuslevyssä etenevä valo jaetaan ”nopean” ja ”hitaan” ominaisaallon lineaarikombinaatioon koordinaatistomuunnoksella

$$\begin{pmatrix} V_s \\ V_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} = R(\psi) \mathbf{V}, \quad (5.5)$$

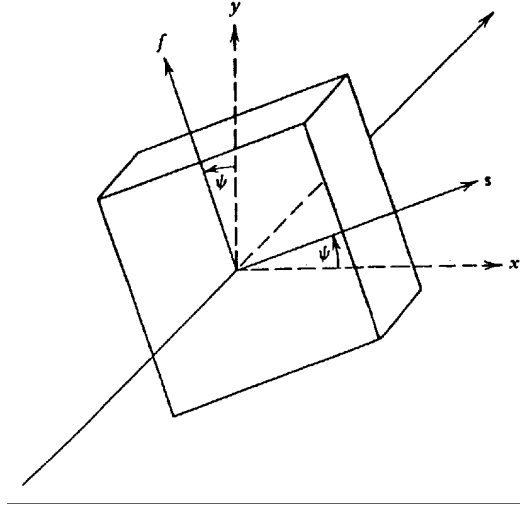
missä  $V_s$  on  $\mathbf{V}$ :n hidas komponentti ja  $V_f$  on  $\mathbf{V}$ :n nopea komponentti. ”Hidas”- ja ”nopea”-akseli on kiinnitetty kiteen suhteen. Ominaisaalloilla on eri vaihenopeudet hidastuslevyissä, jolloin toinen hidastuu toiseen nähden. Tämä hidastus vaihtaa läpäisseen säteen polarisaatiotilan [13].

”Hitaan” ja ”nopean” komponentin taitekertoimet merkitään  $n_s$  ja  $n_f$ . Läpäisseen valon polarisaatiotasoa kiteen  $sf$ -koordinaatistossa on

$$\begin{pmatrix} V_s' \\ V_f' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{(-in_s l \frac{\omega}{c})} & 0 \\ 0 & e^{(-in_f l \frac{\omega}{c})} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_s \\ V_f \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

missä  $l$  on levyn paksuus,  $\omega$  on valosäteen taajuus ja  $i$  on imaginaariyksikkö. Suhteellinen vaihehidastus  $\Gamma$  on eksponenttien erotus

$$\Gamma = (n_s - n_f) \frac{\omega l}{c}. \quad (5.7)$$



**Kuva 5.1:** Hidastuslevy kulmassa  $\psi$  [13].

Keskimääräinen absoluuttinen vaihemuutos on

$$\phi = \frac{1}{2}(n_s + n_f)\frac{\omega l}{c}. \quad (5.8)$$

Käyttämällä kaavoja (5.7) ja (5.8) saadaan kaava (5.6) muotoon

$$\begin{pmatrix} V'_s \\ V'_f \end{pmatrix} = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_s \\ V_f \end{pmatrix}. \quad (5.9)$$

Läpäisseen säteen polarisaatiotason Jones-matriisi  $xy$ -koordinaatistossa saadaan  $sf$ -koordinaatiston takaisinmuunnoksella

$$\begin{pmatrix} V'_x \\ V'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V'_s \\ V'_f \end{pmatrix}. \quad (5.10)$$

Merkitään kiertomatriiseja  $R(\psi)$

$$R(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi \\ -\sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

ja  $R(-\psi)$

$$R(-\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi \end{pmatrix} \quad (5.12)$$

sekä hidastuslevyn Jones-matriisia  $W_0$

$$W_0 = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} e^{-i\frac{\Gamma}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\frac{\Gamma}{2}} \end{pmatrix}. \quad (5.13)$$



Kaavoista (5.5) ja (5.9) - (5.13) saadaan hidastuslevyn aiheuttama muutos

$$\begin{pmatrix} V'_x \\ V'_y \end{pmatrix} = R(-\psi)W_0R(\psi) \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix}. \quad (5.14)$$

Vaihetekijä  $e^{-i\phi}$  voidaan jättää huomiotta, jos interferenssiefekti ei ole tärkeä tai havaittavissa. Hidastuslevy on esitettävissä kolmen matriisin tulona

$$W = R(-\psi)W_0R(\psi). \quad (5.15)$$

Koska hidastuslevyn Jones-matriisi on unitaarimatriisi eli

$$W^\dagger W = 1 \quad (5.16)$$

missä  $\dagger$  esittää konjugaattia, kahden säteen kohtisuorat polarisaatiotasot pysyvät ristikkäin läpäistessään mielivaltaisen hidastuslevyn [13].

Ideaalisen lineaarisen levypolarisaattorin Jones-matriisi, jonka läpäisyakseli on  $x$ -akseli, on

$$P_0 = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5.17)$$

Jones-matriisi polarisaattorille, joka on kulmassa  $\psi$ , on

$$P = R(-\psi)P_0R(\psi). \quad (5.18)$$

Jos absoluuttinen vaihe  $\phi$  jätetään huomiotta, saadaan Jones-matriisi polarisaattorin läpäiselle valolle, kun sen sähkökenttävektorit ovat  $x$ - ja  $y$ -akselin suuntaisia

$$P_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{ja} \quad P_y = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.19)$$

Useimmat kahtaistaittavat systeemit on asetettu polarisaattorien väliin. Jälkimmäistä polarisaattoria kutsutaan analysaattoriksi. Koska levyn hidastus on aallonpituudesta riippuva, läpi menneen säteen polarisaatiotaso riippuu valon aallonpituudesta [13].

Valon säteen Jones-vektori sisältää informaatiota polarisaation lisäksi valon intensiteetistä. Tarkastellaan valon säteen osumista polarisaattoriin. Sähkökenttävektorin Jones-vektori on

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}, \quad (5.20)$$

jolloin intensiteetti saadaan lausekkeesta

$$I = \mathbf{E}^\dagger \cdot \mathbf{E} = |E_x|^2 + |E_y|^2. \quad (5.21)$$

Analysaattorin läpäisseen säteen Jones-vektori on

$$\mathbf{E}' = \begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} \quad (5.22)$$

ja intensiteetti

$$I' = \mathbf{E}'^\dagger \cdot \mathbf{E}' = |E'_x|^2 + |E'_y|^2. \quad (5.23)$$

Kahtaistaittavan optisen systeemin läpäisy  $T$  on [13]

$$T = \frac{I'}{I} = \frac{|E'_x|^2 + |E'_y|^2}{|E_x|^2 + |E_y|^2}. \quad (5.24)$$

Jones-laskennalla voidaan määrätä polaroidun valon eteneminen pitkin nestekiteen kiertoakselia. Kun sähkökenttä ei vaikuta nestekiteeseen, sen molekyylien kallistuskulma  $\theta = 0$ . Oletetaan nestekiteen kiertokulman  $\varphi$  olevan lineaarinen  $z$ -akselin suuntaan, jolloin  $d$  paksuisen nestekiteen kokonaiskiertokulma on

$$\alpha = \varphi d. \quad (5.25)$$

Kiertonemaattinen nestekide voidaan jakaa differentiaalisiin viipaleisiin koh-tisuoraan  $z$ -akselia vastaan. Kukin viipale käyttäytyy kuin homogeeninen yksiakselinen kide [15].

Vaihehidastus nemaattiselle nestekiteelle on

$$\Gamma = \frac{2\pi d}{\lambda}(n_e - n_o), \quad (5.26)$$

missä  $(n_e - n_o)$  on kahtaistaittavuus. Jaetaan nestekide  $N$  samanlaiseen viipa-leeseen. Kunkin viipaleen vaihehidastus on  $\Gamma/N$ . Viipaleet ovat asettuneet kulmiin  $\rho, 2\rho, 3\rho, \dots, (N-1)\rho, N\rho$  siten, että  $\rho = \alpha/N$ . Kokonais-Jones-matriisi  $N$  viipaleelle on

$$J_T = \prod_{m=1}^N R(m\rho)W_0R(-m\rho). \quad (5.27)$$

Matriisi voidaan kirjoittaa muotoon

$$J_T = R(\alpha) \left[ W_0 R\left(-\frac{\alpha}{N}\right) \right]^N, \quad (5.28)$$

missä  $W_0$  on kaava (5.13). Käyttämällä kaavoja (5.12) ja (5.13) saadaan

$$J_T = R(\alpha) \begin{pmatrix} \cos \frac{\alpha}{N} e^{-i\Gamma N/2} & -\sin \frac{\alpha}{N} e^{-i\Gamma N/2} \\ \sin \frac{\alpha}{N} e^{i\Gamma N/2} & \cos \frac{\alpha}{N} e^{i\Gamma N/2} \end{pmatrix}^N \quad (5.29)$$

[13]. Voidaan osoittaa, että kaava (5.29) sievenee  $N$  lähestyessä ääretöntä muotoon [16]

$$J_T = e^{-i\phi} R(\alpha) \begin{pmatrix} \cos \gamma - i\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma & -\frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma \\ \frac{\alpha}{\gamma} \sin \gamma & \cos \gamma + i\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \end{pmatrix}, \quad (5.30)$$

missä [15]

$$\gamma = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (5.31)$$

$$\beta = \frac{\Gamma}{2} = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e - n_o) \quad (5.32)$$

ja

$$\phi = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e + n_o). \quad (5.33)$$

Useimmissa kiertonemaattisissa LCD:ssä on kiertokulma  $\alpha$  on  $90^\circ$ . Kaavasta (5.30) saadaan Jones-matriisi myötäpäivään kiertävälle LCD:lle sijoittamalla  $\alpha = \pi/2$  ja vastapäivään kiertävälle LCD:lle sijoittamalla  $\alpha = -\pi/2$ , jotka merkitään  $J_T^+$  ja  $J_T^-$

$$J_T^+ = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} \frac{\pi}{2\gamma} \sin \gamma & \cos \gamma + i\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \\ -\cos \gamma + i\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma & \frac{\pi}{2\gamma} \sin \gamma \end{pmatrix} \quad (5.34)$$

ja

$$J_T^- = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} \frac{\pi}{2\gamma} \sin \gamma & -\cos \gamma - i\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \\ \cos \gamma - i\frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma & \frac{\pi}{2\gamma} \sin \gamma \end{pmatrix}. \quad (5.35)$$

Tarkastellaan seuraavaksi ainetta, joka on homogeeninen, absorboimaton ja magneettisesti isotrooppinen. Anisotrooppiseen aineeseen varastoituneen sähkökentän  $\mathbf{E}$  energiatiheys  $U_e$  on

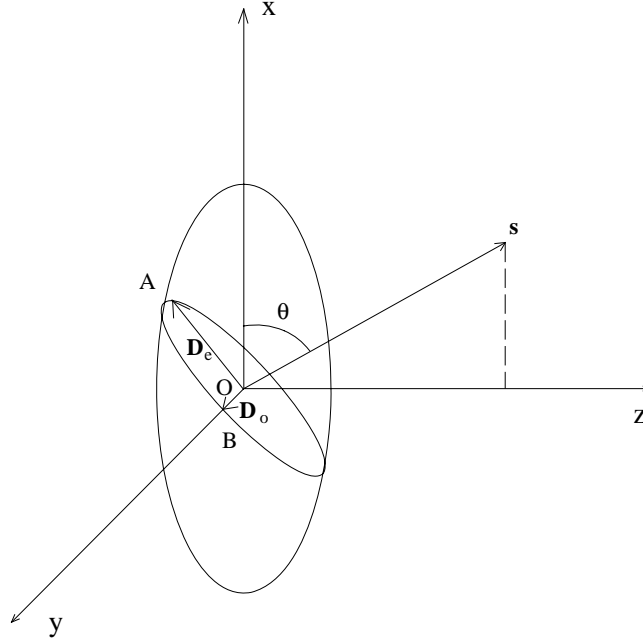
$$U_e = \frac{1}{2} \mathbf{E} \cdot \mathbf{D}, \quad (5.36)$$

missä  $\mathbf{D}$  on sähköinen siirtymä. Vakioenergiatiheydelle  $U_e$  voidaan kirjoittaa kaavasta (5.36)

$$\frac{D_x^2}{\varepsilon_x} + \frac{D_y^2}{\varepsilon_y} + \frac{D_z^2}{\varepsilon_z} = 2U_e, \quad (5.37)$$

missä  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  ja  $\varepsilon_z$  ovat permittiivisyydet. Korvataan  $\mathbf{D}/\sqrt{2U_e}$   $\mathbf{r}$ :llä ja määritellään taitekertoimet  $n_x^2 = \varepsilon_x/\varepsilon_0$ ,  $n_y^2 = \varepsilon_y/\varepsilon_0$  ja  $n_z^2 = \varepsilon_z/\varepsilon_0$ , missä  $\varepsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys, saadaan

$$\frac{x^2}{n_x^2} + \frac{y^2}{n_y^2} + \frac{z^2}{n_z^2} = 1. \quad (5.38)$$



**Kuva 5.2:** Yksiakselisen kiteen indeksiellipsoidi.

Tämä on yleinen ellipsoidin yhtälö, jonka pääakselit ovat  $x$ ,  $y$  ja  $z$  akselien suuntaiset ja suuruudeltaan  $2n_x$ ,  $2n_y$  ja  $2n_z$ . Ellipsoidia kutsutaan myös indeksiellipsoidiksi (index ellipsoid) ja optiseksi indikatriseksi (optical indicatrix). Yksiakselisen kiteen indeksiellipsoidi sievenee muotoon

$$\frac{x^2}{n_e^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_o^2} = 1, \quad (5.39)$$

missä optiseksi akseliksi on valittu  $x$ -akseli kuten kuvassa 5.2.

Etenemissuuntaa kuvaa vektori  $\mathbf{s}$ . Suuntaa  $\mathbf{s}$  vastaan kohtisuora taso leikkaa ellipsoidin ja muodostaa ellipsin. Ellipsin pääakselin AO pituus on ekstraordinaarisäteen taitekerroin  $n_e(\theta)$ , jonka sähköinen siirtymä  $\mathbf{D}_e(\theta)$  on samansuuntainen kuin OA. Ordinaarisäteen taitekerroin  $n_o$  on BO vektorin pituus. Kun optisen akselin ja  $\mathbf{s}$ :n välinen kulma muuttuu,  $n_o$  pysyy muuttumattomana, kun taas  $n_e(\theta)$  muuttuu arvosta  $n_o$  kulmalla  $\theta = 0^\circ$  arvoon  $n_e$  kulmalla  $\theta = 90^\circ$ . Kun  $\theta = 90^\circ$ ,  $\mathbf{s}$  on  $z$ -akselilla, silloin  $\mathbf{D}_e(\theta)$  on  $xy$ -tasossa ja kaava (5.39) sievenee muotoon

$$\frac{x^2}{n_e^2} + \frac{y^2}{n_o^2} = 1. \quad (5.40)$$

$xy$ -tasossa  $n_e(\theta)$  saadaan

$$n_e(\theta) = \frac{x}{\sin \theta} \quad \text{ja} \quad n_e(\theta) = \frac{y}{\cos \theta}. \quad (5.41)$$

Yhdistämällä kaavat (5.40) ja (5.41) saadaan [13]

$$\frac{1}{n_e(\theta)^2} = \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2}. \quad (5.42)$$

Kun sähkökenttä on kytketty  $z$ -akselin suuntaan, molekyylien kallistus- ja kiertokulmat muuttuvat epälineaarisesti jännitteen funktiona. Epälineaarisuudesta johtuen on mahdotonta johtaa eksplisiittinen Jones-matriisiesitys. Tämä voidaan kiertää tekemällä seuraavat approksimaatiot [15].

Kallistuskulma  $\theta$  on hitaasti muuttuva funktio, joten voidaan sitä approksimoida keskiarvona. Kallistuskulma riippuu nestekiteen käyttöjännitteestä  $V_{rms}$

$$\theta = \begin{cases} 0, & V_{rms} < V_c \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left[ e \left( -\frac{V_{rms} - V_c}{V_0} \right) \right], & V_{rms} \geq V_c, \end{cases} \quad (5.43)$$

missä  $V_c$  on kynnsjännite ja  $V_0$  on ylijännite (excess voltage). Koska kiertokulma  $\varphi$  muuttuu hitaasti  $z$ :n ja  $V_{rms}$ :n funktiona, se voidaan approksimoida lineaarisena  $z$ :n funktiona,  $\varphi = \alpha z/d$  [15].

Näillä kahdella oletuksella saadaan eksplisiittinen esitys Jones-matriisille  $J_T$ . Approksimoidun mallin  $\beta$  ja  $\phi$  ovat [15]

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e(\theta) - n_o) \quad (5.44)$$

ja

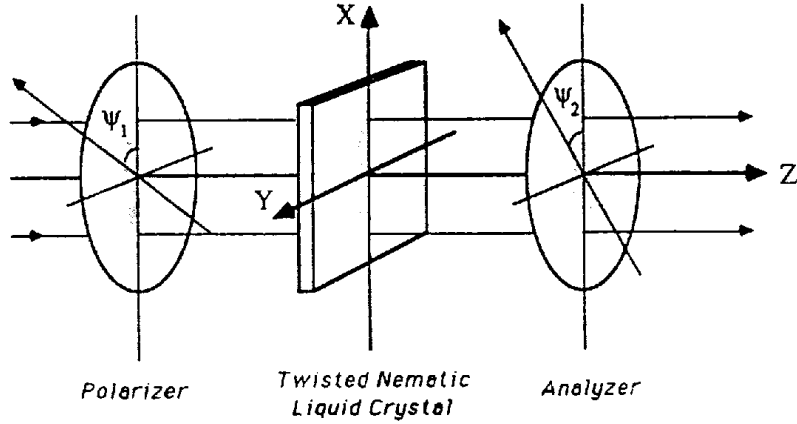
$$\phi = \frac{\pi d}{\lambda} (n_e(\theta) + n_o). \quad (5.45)$$

Asetetaan kiertonemaattinen nestekidemateriaali polarisaattorin ja analyysaattorin väliin, jotka ovat kulmissa  $\psi_1$  ja  $\psi_2$   $x$ -akseliin nähden, kuten kuvassa 5.3 on esitetty. Jones-laskennalla saadaan laskettua systeemin amplitudiläpäisy. Lineaarisesti polaroitunut valo menee sisään systeemiin. Läpituluvan valon Jones-vektori  $\mathbf{E}'$  systeemille, jossa on myötäpäivään  $90^\circ$  kiertävä nestekide, on

$$\mathbf{E}' = P_0 R(\psi_2) J_T^+ R(-\psi_1) \mathbf{E}, \quad (5.46)$$

missä  $P_0$  on analysaattori, jonka sähkökenttävektori on  $x$ -akselin suuntainen (kaava (5.17)). Analysaattorin Jones-matriisi on

$$P_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5.47)$$



**Kuva 5.3:** LCD polarisaattorin ja analysaattorin välissä [12].

ja  $\mathbf{E}$  on sisäänmenevän valon Jones-vektori, joka on

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.48)$$

Kun merkitään  $\mathbf{E}' = \begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix}$ , kaavoista (5.24) ja (5.46) saadaan läpäisylle [12]

$$T^+ = |E'_x|^2 = \left[ \frac{\pi}{2\gamma} \sin \gamma \cos(\psi_1 - \psi_2) + \cos \gamma \sin(\psi_1 - \psi_2) \right]^2 + \left[ \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \sin(\psi_1 + \psi_2) \right]^2. \quad (5.49)$$

Vastapäivään  $90^\circ$  kiertävällä nestekiteellä läpäisyyksi saadaan vastaavasti

$$T^- = |E'_x|^2 = \left[ \frac{\pi}{2\gamma} \sin \gamma \cos(\psi_1 - \psi_2) - \cos \gamma \sin(\psi_1 - \psi_2) \right]^2 + \left[ \frac{\beta}{\gamma} \sin \gamma \sin(\psi_1 + \psi_2) \right]^2. \quad (5.50)$$

Jos myötä- ja vastapäivään  $90^\circ$  kiertävät nestekidenäytöt asetetaan peräkkäin, niiden yhteinen Jones-matriisi saadaan kertomalla ne keskenään [16]

$$J_{T2} = J_T^+(\beta_1, \gamma_1) J_T^-(\beta_2, \gamma_2) = \begin{pmatrix} A_1 + iA_2 & B_1 + iB_2 \\ -B_1 + iB_2 & A_1 - iA_2 \end{pmatrix}, \quad (5.51)$$

missä

$$\begin{aligned}
A_1 &= \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 + \left( \frac{\pi^2}{4\gamma_1\gamma_2} + \frac{\beta_1\beta_2}{\gamma_1\gamma_2} \right) \sin \gamma_1 \sin \gamma_2, \\
A_2 &= \frac{\beta_1}{\gamma_1} \sin \gamma_1 \cos \gamma_2 - \frac{\beta_2}{\gamma_2} \cos \gamma_1 \sin \gamma_2, \\
B_1 &= -\frac{\pi}{2\gamma_1} \sin \gamma_1 \cos \gamma_2 + \frac{\pi}{2\gamma_2} \cos \gamma_1 \sin \gamma_2, \\
B_2 &= \frac{\pi}{2\gamma_1\gamma_2} (\beta_1 - \beta_2) \sin \gamma_1 \sin \gamma_2.
\end{aligned} \tag{5.52}$$

Systemin läpäisseen valon Jones-vektori  $\mathbf{E}'$  lasketaan

$$\mathbf{E}' = P_0 R(\psi_2) J_{T_2} R(-\psi_1) \mathbf{E}. \tag{5.53}$$

Läpäisyksi  $T_2$  saadaan

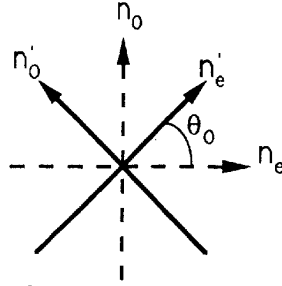
$$\begin{aligned}
T_2 = |E'_x|^2 &= [A_1 \cos(\psi_1 - \psi_2) + B_1 \sin(\psi_1 - \psi_2)]^2 \\
&+ [A_2 \cos(\psi_1 + \psi_2) + B_2 \sin(\psi_1 + \psi_2)]^2.
\end{aligned} \tag{5.54}$$

### 5.2.2 Ferrosähköinen nestekidepaikkamodulaattori

Ferrosähköisten LCLV suorituskykyjä SLM:na on tutkittu paljon, mm. [7] [9] [10] [25] [26] [27] [28] ja niiden käyttämistä optisissa prosessointisoveluksissa, esim. [7] [8] [27] [29] [30]. Kiertonemaattiseen LCD:n verrattuna ferrosähköiset LCLV:t ovat toiminnaltaan nopeampia ja optisella osoituksella saadaan koko näyttö osoitettua yhden toimintajakson aikana. Ferrosähköisten LCLV resoluutio-ominaisuudet paranevat koko ajan niiden valmistustekniikoiden kehittyessä.

Ferrosähköisellä LCLV:llä voidaan moduloida amplitudia ja vaihetta. Tyyppillisesti vaihe- ja amplitudimodulointi liittyvät toisiinsa. Jos vaihetta muutetaan, niin myös amplitudi muuttuu. Peräkkäisillä modulaattoreilla voidaan toteuttaa toisistaan riippumaton amplitudi- ja vaihemodulaatiotilojen hallinta. Lineaarisesti polaroitunut valo menee ferrosähköisen nestekiteen läpi, joka toimii kuin puoliaaltohidastin (half-wave retarder), ja kohtaa analysaattorin, joka tuottaa joko amplitudi- tai vaihemodulaation. Ympyräpolaroituneella valolla voidaan toteuttaa puhdas vaihemodulaatio [25].

Ferrosähköistä nestekidettä (ferroelectric liquid crystal, FLC) voidaan mallintaa kahtaistaittavalla aineella, jonka paksuus on  $d$  ja ordinaaritaitekerroin akseli  $n_o$  ja ekstraordinaaritaitekerroin akseli  $n_e$ . Smektisessä C\* materiaalissa nämä akselit voivat olla kahdessa asennossa riippuen käyttöjännitteen merkistä, kuten kuvassa 5.4. Jones-laskennalla voidaan kuvata valon käyttäytymistä, kun valo läpäisee polarisaattorien välissä olevan ferrosähköisen kiteen [25].



**Kuva 5.4:** Smektisen C\* FLC modulaattorin optisten akselien kaksi asentoa. [25].

Hidastuslevyn Jones-matriisi on esitetty kaavassa (5.13). Ferrosähköinen nestekide SLM toimii puoliaaltohidastimena, jolloin  $\Gamma = \pi$  ja tulevan lineaarisesti polaroituneen valon polarisaatiotaso ei muutu sen mennessä systeemin läpi [13]. Kun sijoitetaan  $\Gamma = \pi$  kaavaan (5.13) ja merkitään  $\phi = \frac{\pi}{2} + \frac{\pi d}{\lambda}(n_e + n_o)$  saadaan Jones-matriisi puoliaaltohidastimelle

$$J_\pi = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (5.55)$$

Puoliaalto FLC:n, jonka optinen akseli on  $\theta$  kulmassa laboratorikoordinaatistoon nähden, Jones-matriisi on

$$J_\pi(\theta) = R(-\theta)J_\pi R(\theta) = e^{-i\phi} \begin{pmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{pmatrix}. \quad (5.56)$$

Kun FLC on asettunut  $0^\circ$  kulmaan, kutsutaan asentoa tilaksi 0 ja matriisia merkitään  $J_\pi(0)$ . Kun optinen akseli on kulmassa  $\theta_o$ , kutsutaan asentoa tilaksi 1 ja matriisia merkitään  $J_\pi(\theta_o)$  [25].

Kun analysaattori on kulmassa  $\beta$   $x$ -akseliin nähden, Jones-matriisi analysaattorille saadaan kaavasta (5.18)

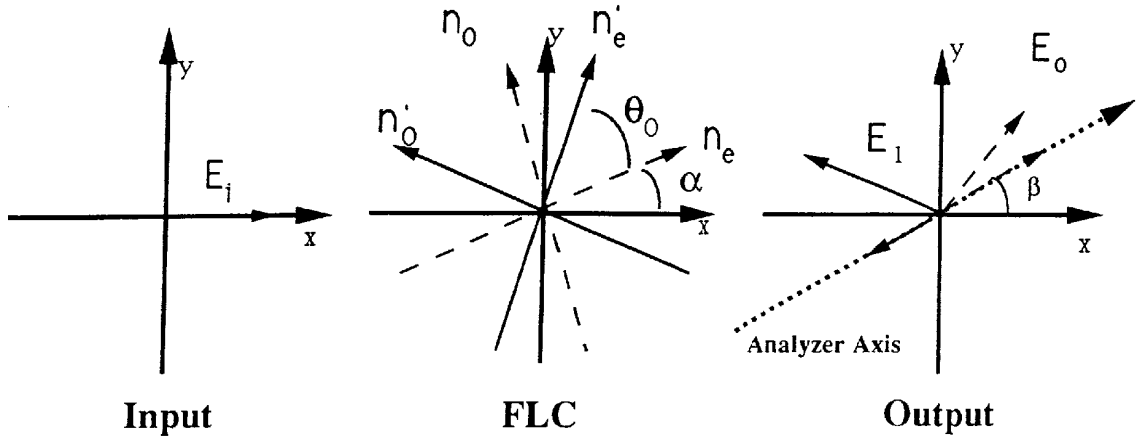
$$A(\beta) = R(-\beta)P_0R(\beta) = \begin{pmatrix} \cos^2 \beta & \sin \beta \cos \beta \\ \sin \beta \cos \beta & \sin^2 \beta \end{pmatrix}, \quad (5.57)$$

missä  $P_0$  kaavan (5.47) mukaan [25].

Tarkastellaan tilannetta, jossa ferrosähköiseen nestekiteeseen saapuu  $x$ -akselin suuntaan lineaarisesti polaroitunut valo. Kuvassa 5.5 on esitetty systeemin komponenttien asennot. Lineaarisesti polaroituneen valon Jones-vektori on

$$\mathbf{E}_{in} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5.58)$$





**Kuva 5.5:** Amplitudimodulaatio FLC:llä. Tuleva valo on polaroitunut  $x$ -akselin suuntaisesti. Ensimmäisessä tilassa FLC:n akselit  $n_o$  ja  $n_e$  ovat asettuneet kulmaan  $\alpha$   $x$ -akselin suhteen ja toisessa tilassa kääntynyt lisää kulman  $\theta_o$  verran. Analysaattori asetettu kulmaan  $\beta$ . Tuloksena on kaksi polarisaatiotilaa  $\mathbf{E}_0$  ja  $\mathbf{E}_1$  eri amplitudeilla [25].

Laitteen optinen akseli on tilassa 0 kulmassa  $\alpha$  ja tilassa 1 kulmassa  $\alpha + \theta_o$ . Analysaattorin läpäisseen valon Jones-vektori tilassa 0 on

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_o^0 &= A(\beta)J_\pi(\alpha)\mathbf{E}_{in} \\ &= e^{-i\phi} \cos(2\alpha - \beta) \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.59)$$

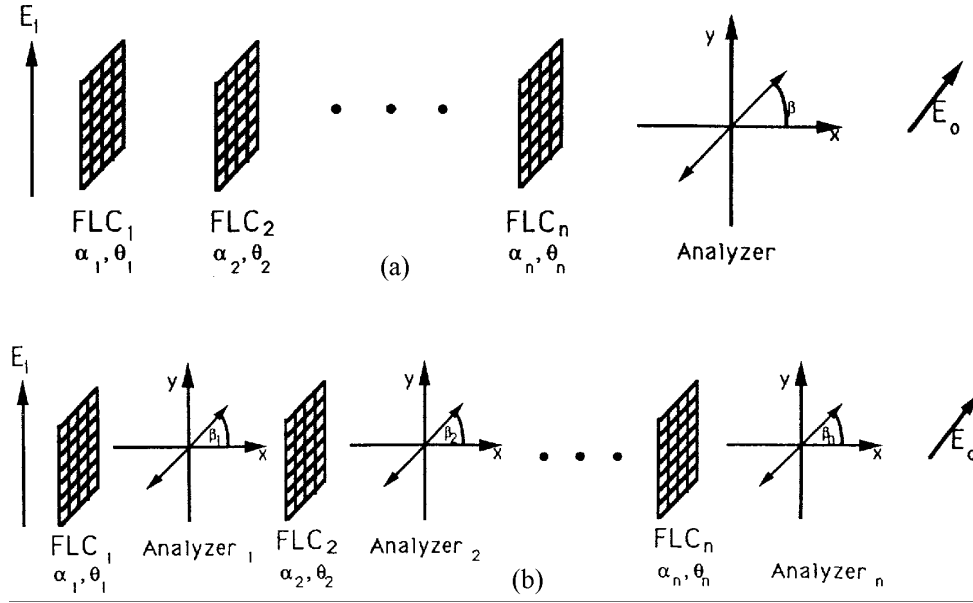
ja tilassa 1 on

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_o^1 &= A(\beta)J_\pi(\alpha + \theta_o)\mathbf{E}_{in} \\ &= e^{-i\phi} \cos(2\alpha + 2\theta_o - \beta) \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5.60)$$

Kun merkitään  $\hat{\beta} = 2\alpha - \beta$  ja  $s$  on 0 tai 1, kaavat (5.58), (5.59) ja (5.60) voidaan yhdistää muotoon

$$\mathbf{E}_o(s) = e^{-i\phi} \cos(2s\theta_o + \hat{\beta}) \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}. \quad (5.61)$$

Tämä kaava antaa amplitudimodulaation kaksi mahdollista tasoa, joille voidaan FLC-aineen kiertokulma valita vapaasti [25].



**Kuva 5.6:** Perättäisten FLC amplitudimodulaattorien kaksi kokoonpanoa: (a)  $n$  FLC:tä ja yksi analysaattori kulmassa  $\beta$  ja (b)  $n$  FLC:tä ja  $n$  analysaattoria. Jokainen analysaattori on eri kulmassa  $\beta_i$  [25].

FLC voidaan asettaa kahdella tavalla peräkkäin: kaikki FLC:t polarisaattorin ja analysaattorin väliin tai kunkin FLC:n jälkeen on analysaattori, kuten kuvassa 5.6 on esitetty. Ensimmäisessä tapauksessa  $n$  kpl FLC:tä suorittaa  $n$  kertaisen amplitudimoduloinnin. Jokaisella FLC $_i$ :llä on kiertokulma  $\theta_i$  ja jokainen FLC $_i$  on asettunut kulmaan  $\alpha_i$ . Vektorilla  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_n]$  määrätään, mihin tilaan FLC:t asettuvat. Linearisesti polaroidulla valolla saadaan aikaiseksi amplitudimodulointi. Sisäänmenon polarisaatiotaso kääntyy yhteen  $2^n$ :stä kulmasta ja läpäisee ulostulon analysaattorin. Ulostulon Jones-vektori on

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}_o(\mathbf{s}) &= A(\beta) \prod_{i=1}^n (J_\pi(s_i \theta_i + \alpha_i)) \mathbf{E}_{in} \\
 &= \cos(\hat{\beta} + \sum_{i=1}^n ((-1)^{(i+n)} 2s_i \theta_i)) \begin{pmatrix} \cos \beta \\ \sin \beta \end{pmatrix}. \quad (5.62)
 \end{aligned}$$

Kulma  $\hat{\beta}$  määrätään kuten edellä käyttäen kulmia  $\alpha_i$  ja  $\beta$  [25].

Toisessa tapauksessa analysaattori on kunkin FLC jälkeen. Jokaisella FLC $_i$ :llä on kiertokulma  $\theta_i$  ja jokainen FLC $_i$  on asettunut kulmaan  $\alpha_i$ . Ulos-

tulon Jones-vektori on

$$\mathbf{E}_o(\mathbf{s}) = \prod_{i=1}^n (\cos(2s_i\theta_i + \hat{\beta}_i)) \begin{pmatrix} \cos \beta_n \\ \sin \beta_n \end{pmatrix}. \quad (5.63)$$

Kulma  $\hat{\beta}_i$  määrätään kulmien  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ja  $\beta_{i-1}$  avulla. Systeemin kokonaismodulaatio on kunkin levyn läpäisyn tulo. Koska kullakin levyllä on kaksi tilaa, tiloja koko systeemillä on  $2^n$  [25].

## 5.3 Optinen laskenta

### 5.3.1 Optinen numeerinen prosessointi

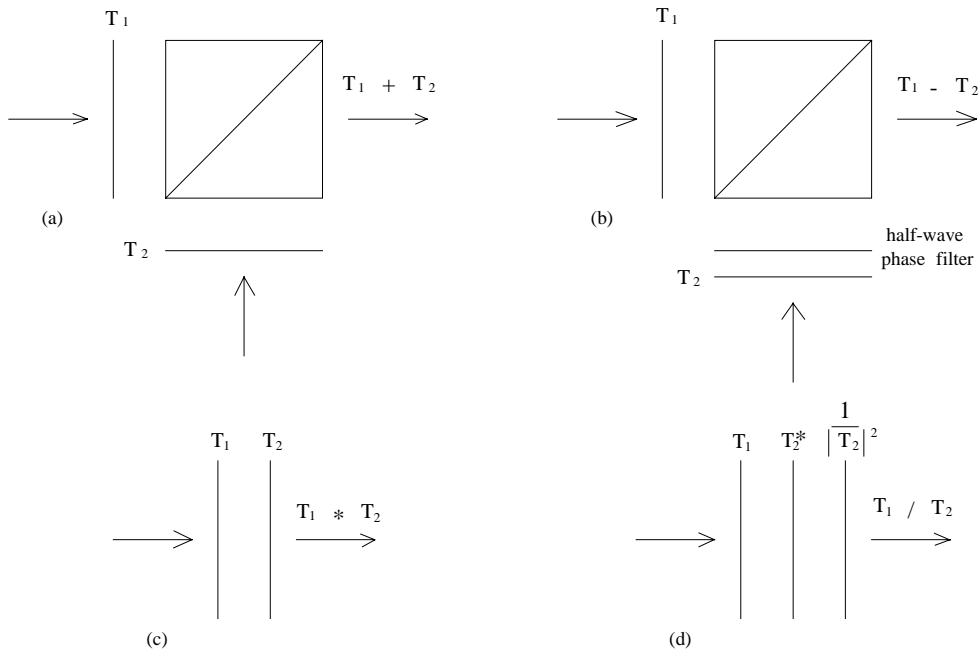
Optinen kertolasku on helpoin aritmeettinen operaatio. Koherentin valon osuessa esim. diakuvaan, valon säteen amplitudi on kerrottu dian läpäisyllä. Kuvassa 5.7 (c)) on esitetty kahden maskin, joiden läpäisyt ovat  $T_1$  ja  $T_2$ , kertominen. Koherentille valolle läpäisy on kompleksinen, jolloin myös vaihe muuttuu. Epäkoherentin valon osuessa maskiin, sen intensiteetti kerrotaan läpäisyllä. Optinen summaus voidaan toteuttaa esim. moduloimalla läpäisyillä  $T_1$  ja  $T_2$  kahta erillistä valonsädettä ja yhdistämällä ne säteenjakajalla (beam splitter). Säteenjakaja on varsinaisesti puoliläpäiseväpeili. Yhteenlaskusysteemi on esitetty kuvassa 5.7 (a). Koherentilla valolla kompleksiset amplitudit interferoivat ja epäkoherentilla intensiteetit summautuvat. Optinen vähennyslasku toteutetaan koherentilla valolla helpoiten  $\pi$ :n vaihe-siirrolla, joka perustuu siihen, että  $e^{i\pi} = -1$ . Systeemi on muuten samanlainen kuin yhteenlaskusysteemi paitsi, että toinen valonsäde kulkee vaihelevyn läpi, joka aiheuttaa  $\pi$ :n suuruisen viiveen verrattuna toiseen säteeseen (Kuva 5.7 (b)). Epäkoherentilla valolla vähennyslasku toteutetaan suurtaajuushilamenetelmällä (high-frequency grating). Optinen jakolasku toteutetaan kahdella kertolaskulla, joka perustuu kaavaan

$$\frac{1}{T} = \frac{T^*}{TT^*} = \frac{T^*}{|T|^2},$$

missä  $T^*$  on läpäisyn  $T$  kompleksikonjugaatti. Reaaliarvoinen  $\frac{1}{|T|^2}$  maski voidaan valmistaa filmin kehitysmenetelmällä. Kuvassa 5.7 (d) on esitetty jakolaskun optinen toteutus kolmella maskilla [31].

### 5.3.2 Loogiset operaatiot

Binaariset loogiset operaatiot ovat perusoperaatioita tietokoneissa. Jos optisesti pystytään toteuttamaan peruslogiikkaportit, kuten NOT, AND, OR, NAND, NOR jne., niin silloin on toteutettavissa digitaaliopintinen tietokone.



**Kuva 5.7:** (a) Optinen summaus, (b) vähennys, (c) kertominen ja (d) jakaminen [31].

Optisen binäärilogiikan toteuttamistapoja on tutkittu laajasti. Näiltä laitteilta vaaditaan nopeaa kytkentäaikaa, vähäistä tehon kulutusta, sekä hyviä stabiilisuutta, resoluutio ja kontrasti ominaisuuksia eri ympäristön olosuhteissa. Laitteita on myös voitava asettaa peräkkäin ja niiden on pystyttävä monitasoiseen logiikkaan (multilevel logic). Monitasoisessa logiikassa ei ole ainoastaan kaksi sisäänmenoa ja yksi ulostulo, vaan sisäänmenoja ja ulostuloja voi olla useampia [31].

Eräs optisen binäärilogiikan toteutustapa on LUT-menetelmä (look up table, LUT). LUT-menetelmässä ohjataan valoa havaitsevan detektorin, esim. CCD-kameran, LUT:ia siten, että detektorille tuleva intensiteetti kynnys-  
tetään sopivasti vastaamaan loogisia funktioita. Kaikkia loogisia operaatioita ei tarvitse toteuttaa, koska esim. AND ja NOT tai OR ja NOT operaatioiden eri kombinaatioilla voidaan esittää kaikki 16 loogista operaatiota [31].

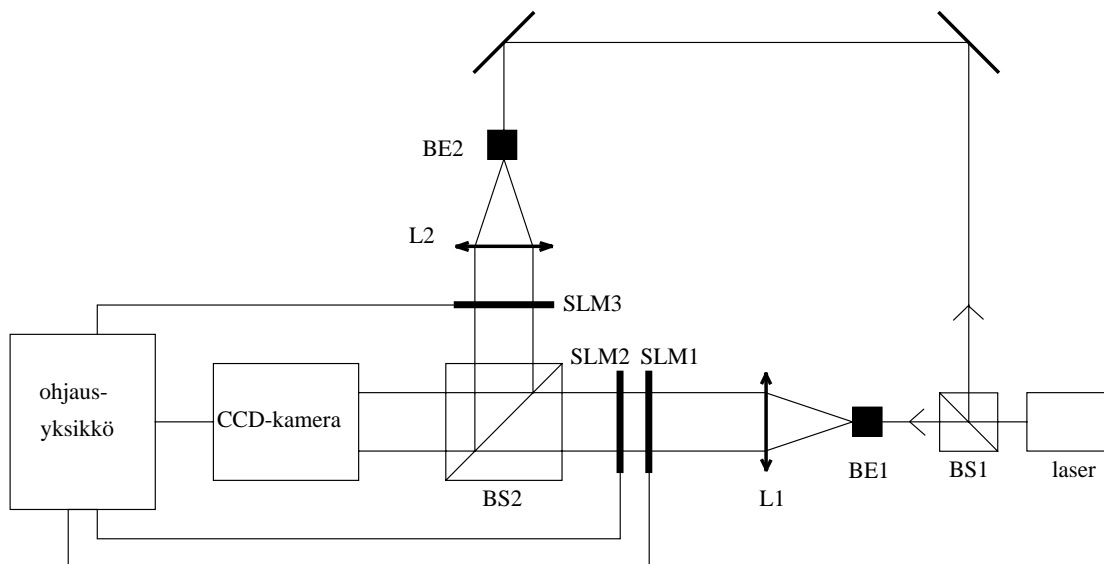
## 6.1 Laitteisto

Mittaussysteemin alustana oli ZERO-G Vibration Isolation Systems:n optinen pöytä, jonka tasapainoa säätelivät paineilmalla toimivat ilmatyynyt. Mittaussysteemin osat kiinnitettiin pöytään MELLES GRIOT siirtopöydillä, magneettikiinnitteisillä KANETSU MB-B ja ruuvikiinnitteisillä tangoilla.

Monokromaattisena valon lähteenä käytettiin SIEMENS LGK 7672 helium-neon-laseria, jonka teho oli 5 mW ja aallonpituus 632 nm. Lasersäteen ohjauksessa käytettiin kahta MELLES GRIOT:n pyöreätä tasopeiliä, joiden halkaisijat olivat 50.0 mm. Lasersäteen levittämiseen käytettiin OFR:n neulanreikäsystemiä, missä OFR:n  $20\times$  linseillä säde kohdistettiin  $5\ \mu\text{m}$  ja  $10\ \mu\text{m}$  reikiin. Levitetyn lasersäteen kokoamiseen käytettiin kahta MELLES GRIOT:n akromaattista 300 mm:n polttovälin linssiä, joiden halkaisijat olivat 50.0 mm. Lasersäteen jakamiseen ja yhdistämiseen käytettiin kahta OFR:n kuutiomaista säteenjakajaa, joista pienemmän särmä oli 15 mm ja suuremman  $2''$ . Säteenjakajat oli valmistettu lasista ja niiden toiminta-alue oli 450 - 650 nm.

Paikkamodulaattorina käytettiin SHARP XV-100ZM videoprojektorin kolmea LCD-näyttöä, jotka oli irrotettu projektorista ja asennettu omille telineilleen. Näytöt oli tyypiltään  $90^\circ$  kiertonemaattisia (TN) ohutkalvotransistori (TFT) näyttöjä, joiden ohjaussysteeminä oli vaihtovirta-aktiivimatriisi. Näytössä oli  $512\times 512$  pikseliä. Yhden pikselin koko oli n.  $0.123\times 0.086$  mm. Kahden peräkkäisen näytön systeemissä jälkimmäisestä näytöstä oli poistettu etummainen polarisaattori, jotta ensimmäisessä näytössä lineaarisesti polaroitunut valo läpäisi jälkimmäisen näytön.

Kuvat otettiin Javelin CCD-kameralla, jonka kuvakoko oli  $512\times 512$  ja erotuskyky 256 harmaatasoa. Kameran objektiivi oli CIMKO MT, jonka valovoima oli 1:2.8, polttoväli 135 mm, linssin halkaisija 55 mm ja lyhyin tarken-



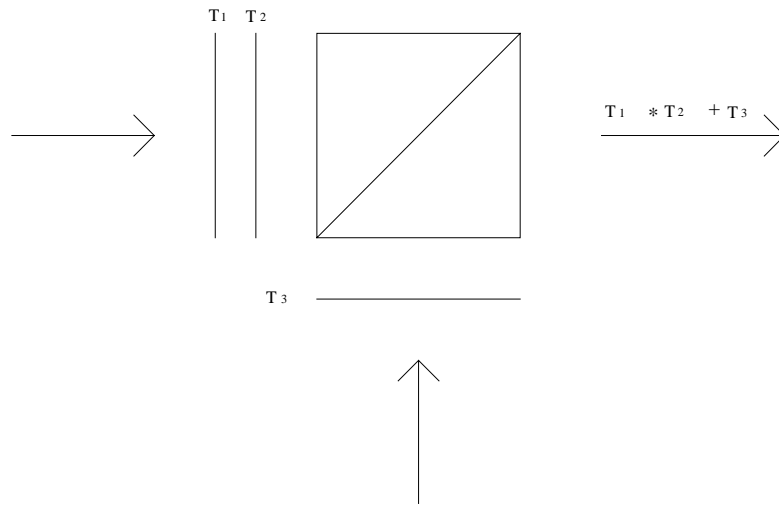
**Kuva 6.1:** Mittaussysteemin kaavakuva.

nusväli 1.5 m. Videosignaalin ohjauslaitteena oli HAMAMATSU C2400-50. Kameran kuvien katselussa käytettiin SONY Trinitron väri monitoria.

Kameran ja LCD-näyttöjen ohjaukseen käytettiin kahta MATROX PIP Video Digitizer Board PIP-512B kuvakorttia, jotka oli asennettu INTEL 80386 40 MHz:n mikroprosessorilla ja IIT 3C87-aritmetiikkaprosessorilla varustettuun mikrotietokoneeseen. Toisella kortilla ohjattiin kolmea videoprojektorin LCD-näyttöä ja toisella kameraa sekä monitoria. Korteilla oli DB-9 RGB ulostulot, jotka kytkettiin monitorin ja videoprojektorin SCART-liittimiin. Kameran kuvakorttiin kytkettiin kameran ohjauslaitteen ulostulosta audio/video-signaali RCA-liittimellä. Kameraa ja näyttöjä ohjattiin C-kielellä tehdyllä ohjelmalla, jossa käytettiin Microsoft C++ Ver 7.00 ohjelman standardikirjastoja ja kuvakortin C-ohjelmakirjaston aliohjelmia.

## 6.2 Mittaussysteemi

Lasersäteen intensiteetin modulointi toteutettiin kuvan 6.1 mukaisella systeemillä. Laserin koherentti valo jaettiin säteenjakajalla BS1 kahteen säteeseen. Säteenjakajasta BS1 heijastunut säde ohjattiin kahdella peilillä neulanreikä-



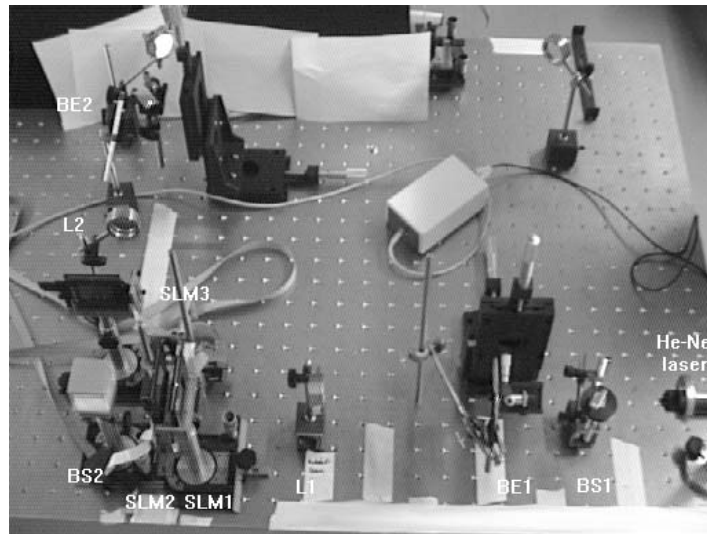
**Kuva 6.2:** Optinen tulo ja summaus.

systemiin BE2 ja säteenjakajasta BS1 läpi mennyt säde jatkoi neulanreikäsystemiin BE1. Linsseillä L1 ja L2 koottiin levinneet säteet yhdensuuntaisiksi intensiteettijakaumiksi, jotka osuivat paikkamodulaattoreihin SLM1, SLM2 ja SLM3. Valon intensiteetti moduloitui paikkamodulaattoreiden läpäisyfunktioilla  $T_1$ ,  $T_2$  ja  $T_3$ , kuvan 6.2 mukaisesti. Paikkamodulaattorit läpäisseen valon intensiteetti summattiin säteenjakajassa BS2, joka havaittiin CCD-kameralla.

### 6.3 Systemin linjaus

Linjaaminen oli suoritettava pimeässä huoneessa. Laser asetettiin mittaustalustan toiseen päähän, jotta kaikki laitteet mahtuivat pöydälle. Laser oli asetettava sellaiselle korkeudelle, missä kaikki laitteet olivat optisella akselilla. Säde linjattiin alustan pitemmän särmän suuntaiseksi merkitsemällä pöydän toiseen päähän kiinnitetylle varjostimelle kiintopiste. Jokaisen laitteen lisäämisen jälkeen tarkistettiin systemin linjaus kiintopisteeseen.

Laserin linjauksen jälkeen linjattiin neulanreikäsystemi BE1, joka asetettiin MELLES GRIOT -siirtopöydille. Neulanreikäsystemi linjattiin ensin ilman reikää, jolloin linsistä heijastuneet säteet kohdistettiin takaisin laseriin. Reiän linjausta varten asetettiin reikä paikoilleen ja neulanreikäsystemin linssi mahdollisimman kauas reiästä, jolloin oli helpointa löytää reiän läpäisyt levinnyt säde reiän taakse asetetulta paperilta. Reikää siirrettiin telineneen mikrometriruuveilla siihen kohtaan, missä levinnyt säde oli kirkkaimmillaan. Siirtämällä linssiä lähemmäs reikää säde leveni ja himmeni. Siirtämällä



**Kuva 6.3:** Valokuva mittaussysteemistä.

reikää uudelleen saatiin säde oikeaan kohtaan ja kirkkaammaksi. Näin jatkettiin kunnes saatiin niin leveä säde, että sen halkaisija oli suurempi kuin kokoavan linssin halkaisija.

Levitetyn säteen kokoamiseen käytetty linssi L1 asetettiin noin polttovälin ( $f = 300\text{mm}$ ) päähän neulanreikäsystemistä. Reikä oli linssin polttopisteessä, kun linssin läpi tulleen säteen halkaisija oli vakio koko matkan linssistä kiintopisteeseen. Linssi oli kohtisuorassa sädettä vastaan, kun säteen keskipiste oli kiintopisteessä.

Laserin ja neulanreikäsystemin BE1 väliin asetetulla säteenjakajalla BS1 saatiin yhteenlaskusysteemille oma säde. Säteenjakaja oli kohdallaan neulanreikäsystemin ja laserin kanssa, kun säteenjakajasta takaisin heijastuneet säteet kohdistettiin laseriin ja neulanreikäsystemistä heijastuneet säteet kohdistettiin samaan pisteeseen seinälle. Säteen ohjaamiseen käytettävät kaksi peiliä asetettiin siten, että säde oli pöydän lyhyemmän särmän suuntainen, jolloin säde oli kohtisuorassa säteenjakajan läpäissyttä sädettä vastaan. Neulanreikäsystemi BE2 ja kokoava linssi L2 asetettiin samoin kuin edellä. Säteet yhdistävä säteenjakaja BS2 linjattiin keilojen risteyskohtaan siten, että yhdistetyn säteen keskipiste oli kiintopisteessä.

Kiintopisteen tilalle asetettiin CCD-kamera, jolla havainnointiin näytöt läpäisseen säteen intensiteettijakauma. Näytöt SLM1 ja SLM2 asetettiin linssin L1 ja säteenjakajan BS2:n väliin mahdollisimman lähelle säteenjakajaa siten, että näyttöjen  $(0,0)$ -koordinaatti oli laserin suunnasta katsottuna vasemmassa yläkulmassa eli näyttöjen ”katselusuunta” oli laseriin päin. Samalla tavoin asetettiin näyttö SLM3 linssin L2 ja säteenjakajan BE2 väliin.

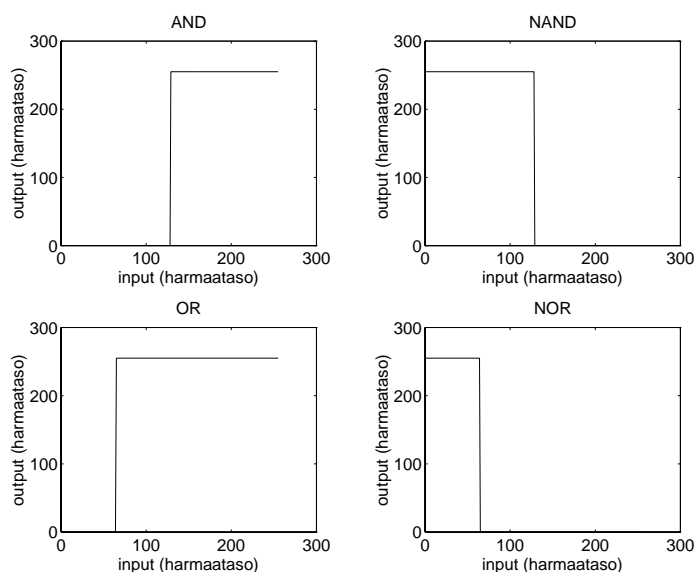


Yhdellä kuvakortilla pystyttiin ohjaamaan yhden näytön kokoista kuvapistematriisia, eli  $512 \times 512$  pikseliä. Yhdellä kuvakortilla saatiin piirrettyä kolmeen näyttöön  $100 \times 100$  pikselin ruutu, kun kunkin näytön ruutu sijoitettiin eri kohtaan kuvapistematriisille, jolloin ruudut eivät menneet päällekkäin. Ruuduista tuli suorakulmiot, koska näyttöjen pikselit olivat suorakulmioita. Näytöt ja ruutu asetettiin siten, että ruutu osui keskelle sädettä. Kahden näytön kertolaskusysteemistä linjattiin ensimmäiseksi näyttö SLM2, jotta nähtiin sen pinnasta syntyvät takaisinheijastukset. Näyttöjen heijastukset suunnattiin neulanreikään BE1, jolloin ne olivat kohtisuorassa sädettä vastaan. Näyttö SLM1 ja näyttö SLM3 linjattiin kuten näyttö SLM2. Neulanreikäsystemien ja linssien väliin, mahdollisimman lähelle reikää, oli asetettava valkoinen muovi, joka teki valosta epäkoherenttia ja hävitti kameralla näkyvän pikselien sähköjohtojen aiheuttaman diffraktiokuvion valkoisesta ruudusta. Koska näytöstä SLM2 oli poistettu polarisaattori, näytölle piirretty musta ruutu nähtiin valkoisena ja valkoinen ruutu mustana. Näytön piirtoindeksi asetettiin päinvastaiseksi kuin muissa näytöissä, eli valkoiseksi, jolloin ruudut nähtiin saman värisinä kaikissa näytöissä.

Näyttöjen ruudut asetettiin tarkemmin kohdalleen siirtämällä ohjelmallisesti ruutuja ja karmillisia ruutuja sekä korjaamalla näyttöjen sivuttaiset kallistukset telineessä olevalla säätöruuvilla. Näytöt SLM1 ja SLM2 olivat kohdallaan, kun näytön SLM2 musta ruutu peitti näytön SLM1 valkoisen ruudun. Näyttö SLM3 oli kohdallaan kun sen valkoinen ruutu peitti näytön SLM1 mustan ruudun, jolla oli valkoiset karmit. Kamera oli kohtisuorassa sädettä vastaan ja sopivan etäällä kuvatusta säteenjakajasta, kun monitorin ruudulle piirretty  $100 \times 100$  karmi kehysti tarkasti näytön SLM3 valkoista ruutua. Kun koko systeemi oli linjattu, ruutujen ja karmin vasemman yläkulman koordinaatit otettiin ylös, jotta ruutujen kohdistusta ei tarvinnut tehdä jokaisella käyttökerralla. Kameran kuvaama valkoinen ruutu oli lähes häiriötön, kun kameran aukko asetettiin isoimmaksi 2.8 ja videosignaalin ohjauslaitteesta asetettiin kontrastin säädöistä OFFSET nolnaan ja GAIN melkein minimiin siten, että häiriö hävisi mustalta alueelta ja valkoinen alue oli mahdollisimman kirkas.

## 6.4 Mittaukset

Ensimmäisenä tutkittiin kahden peräkkäisen näytön kertolaskusysteemiä. Näytöille piirrettiin  $100 \times 100$  pikselin alueelle  $2 \times 2$  ruudun binäärimatriisit, missä valkoinen ruutu vastasi arvoa 1 ja musta ruutu arvoa 0. Koska näytöt oli asetettu ”katselusuunta” laseriin päin, piirrettiin matriisit näytöille peilikuvana, jolloin saatiin tulosmatriisi monitorille oikein päin. Kameralla otettiin  $120 \times 120$  pikselin kuva tulosmatriisista, joka muodostui kahden kennon



**Kuva 6.4:** AND-, NAND-, OR- ja NOR-operaation LUT:t.

läpäisyfunktioiden kombinaatioista. Kameran LUT oli asetettu lineaarisesti, jolloin harmaatasot 0-255 tulostui lineaarisesti mustasta valkoiseksi. Kuvista muodostettiin ohjelmalla  $120 \times 120$  kokonaislukumatriisi, jossa kuvan harmaatasot saivat arvon väliltä 0-255. Mustan pikselin arvo oli 0 ja valkoisen pikselin 255. Muuttamalla kameran LUT:ia saatiin toteutettua AND- ja NAND-operaatiot. AND-operaatiossa LUT porrastettiin siten, että harmaatasot 0-127 tulostuivat TV:n ruudulla mustana ja harmaatasot 128-255 valkoisena. NAND-operaatiossa harmaatasot 0-127 tulostuivat valkoisena ja 128-255 mustana. LUT:n kuvaajat on esitetty kuvassa 6.4.

Näyttöjen toimintanopeutta testattiin syöttämällä kahteen peräkkäiseen näyttöön matriisipareja mahdollisimman suurella nopeudella. Parin tulosmatriisi kuvattiin ennen parin vaihtoa.

Kertolaskusysteemiin lisättiin kolmas näyttö ja summaava osa. Systemistä kuvattiin  $3 \times 3$  ruudun binäärimatriisien tulosmatriisi lineaarisella, OR- ja NOR-operaatioiden LUT:lla. OR-operaatiossa harmaatasot 0-63 muutettiin mustiksi ja 64-255 valkoisiksi. NOR-operaatiossa harmaatasot 0-63 muutettiin valkoisiksi ja 64-255 mustiksi. LUT:n kuvaajat on esitetty kuvassa 6.4.

## 6.5 Tulokset

Kahden peräkkäisen näytön systeemissä näyttöihin syötettiin matriisit

$$\text{SLM1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{ja} \quad \text{SLM2} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6.1)$$

joiden alkiolla voidaan esittää kaikki kahden binääriluvun kombinaatiot. Liitteen A. kuvassa A.1 on kameran kuva näytöistä, jossa näyttöön SLM1 on syötetty kaavan (6.1) matriisi ja näyttö SLM2 on asetettu kokonaan läpinäkyväksi ja liitteen A. kuvassa A.2 näyttö SLM1 on asetettu läpinäkyväksi ja näyttöön SLM2 on syötetty kaavan (6.1) matriisi. Liitteen A. kuvassa A.3 on molempiin näyttöihin syötetty kaavan (6.1) matriisit ja kuvattu tulosmatriisi lineaarisella LUT:lla. Kuvasta A.3 voitiin päätellä, että systeemillä voitaisiin suorittaa kahden matriisin AND- ja NAND-operaatiot. Edellä esitettyjen kahden matriisin AND- ja NAND-operaatioiden tulosmatriisit tulisi olla

$$\begin{aligned} \text{SLM1 AND SLM2} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{SLM1 NAND SLM2} &= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

AND- ja NAND-operaatioiden LUT:lla saatiin tulosmatriisista liitteen A. mukaiset kuvat A.4 ja A.5. Kuvatuissa matriiseissa mustan ja valkoisen alueen raja ei ole tarkka. Lineaarisen LUT:n kuvassa raja on muutaman pikselin levyinen. AND- ja NAND-operaatioiden LUT:lla raja on selvä, mutta rosoinen, ja muutamia yksittäisiä pikseleitä näkyy näytön SLM2 peittämän ruudun takaa. Muuten AND- ja NAND-kuvien matriisit vastaavat kaavan (6.2) matriiseja. Kameralla täytyisi kuvata alkion keskeltä alue, missä alkion arvo olisi oikea, tällöin reunat eivät aiheuta häiriötä.

Vertailun vuoksi tehtiin lineaarisella LUT:lla kuvatulle matriisille AND- ja NAND- operaatiot MATLAB-ohjelmalla. AND-operaatiossa matriisin arvot 0-127 muutettiin 0:ksi ja 128-255 muutettiin 255:ksi. NAND-operaatiossa tehtiin päinvastoin, eli arvot 0-127 muutettiin 255:ksi ja 128-255 muutettiin 0:ksi. Tuloksena saatiin liitteen A. kuvat A.6 ja A.7. Verrattuna näitä kuvia kameralla otettuihin kuviin, ne ovat lähes samanlaiset. Lasketut kuvat eivät olleet niin tasaisia kuin kameran kuvat, vaan niissä erottui muutamia poikkeavia pikseleitä.

Seuraavaksi testattiin kahden näytön toiminta nopeutta. Näytöille syötettiin matriisit ja kameran kuva syntyneestä tulosmatriisista tallennettiin tietokoneen levymuistiin. Kahden näytön nopeustestissä syötettiin matriisit

$$m1 = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad m2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad m3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$m4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad m5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad m6 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (6.3)$$

siten, että ensimmäinen matriisipari oli  $m1$  ja  $m6$ , toinen  $m2$  ja  $m5$ , kolmas  $m3$  ja  $m4$ , neljäs  $m4$  ja  $m3$ , viides  $m5$  ja  $m2$  ja kuudes  $m6$  ja  $m1$ . Matriisien tulostus kennoille oli hidasta. Syötetyt matriisit eivät ehtineet kokonaan tulostua näytöille ennen kuin kameran kuva tallentui levymuistiin. Tämä ilmeni siitä, että tallentunut kuva oli monitorissa ”väpättävä” ja epäselvä. Tulostuksen ja kuvan tallennuksen välille ohjelmoitiin n. 0.1s viive, jonka aikana matriisit ehtivät tulostua näytöille ja kuvat monitorissa olivat selkeät.

Seuraavaksi kerto- ja yhteenlaskusysteemin näytöille syötettiin binääri-matriisit

$$\begin{aligned} \text{SLM1} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, & \text{SLM2} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\ \text{SLM3} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, & & \end{aligned} \quad (6.4)$$

joiden alkiolla voidaan toteuttaa kolmen binääriluvun kaikki kombinaatiot. Liitteen B. kuvissa B.1 ja B.2 on kameran kuvat SLM1:lle ja SLM2:lle syötetyistä matriiseista, kun toinen näytöistä oli vuorollaan läpinäkyvä ja SLM3 oli peitetty. Liitteen B. kuvassa B.3 on kameran kuva SLM3:lle syötetystä matriisista, kun SLM1 ja SLM2 olivat mustana. Lineaarisen LUT:n matriisista, joka on esitetty liitteen B. kuvassa B.4, nähdään, että systeemillä voitaisiin saada aikaan kolmen matriisin AND OR- ja AND NOR-operaatiot. Tulomatriiseiksi OR- ja NOR-operaatioilla pitäisi tulla

$$\begin{aligned} (\text{SLM1 AND SLM2}) \text{ OR SLM3} &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\ (\text{SLM1 AND SLM2}) \text{ NOR SLM3,} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6.5)$$

OR- ja NOR-operaatioiden LUT:lla saatiin tulomatriisista liitteen B. kuvat B.5 ja B.6. Kuten edellä kuvattujen matriisien ruutujen reunat eivät ole tasaisia, mutta muuten matriisit ovat kuin kaavan (6.5) matriisit. Alkioiden oikeat arvot saadaan valitsemalla alkioiden keskeltä tasainen alue.

Vertailun vuoksi tehtiin lineaarisen LUT:n kuvan pikselimatriisille OR- ja NOR-operaatiot MATLAB-ohjelmalla. OR-operaatiossa matriisin arvot 0-63 muutettiin 0:ksi ja 64-255 muutettiin 255:ksi. NOR-operaatiossa päinvastoin,

eli 0-63 muutettiin 255:ksi ja 64-255 muutettiin 0:ksi. Tuloksena saatiin liitteen B. kuvat B.7 ja B.8. Kun näitä kuvia verrataan kameran kuviin, huomataan niiden olevan lähes samanlaiset. Lasketuissa kuvissa oli enemmän tasaisuudesta poikkeavia yksittäisiä pikseleitä.

Teoriaosan alussa, luvussa 2, käsiteltiin nestekiteiden rakennetta. Luvussa 3 paneuduttiin nestekidenäyttötyyppeihin ja niiden toimintaperiaatteisiin. Luvussa 4 esiteltiin nestekidenäyttöjen ohjaustekniikoita. Teoriaosan viimeisessä luvussa, luvussa 5, käsiteltiin kiertonemaattisen ja ferrosähköisen nestekidekennon optisia modulointiominaisuuksia.

Kokeellisessa osassa luvussa 6 esitettiin työssä käytetty laitteisto, mittausjärjestelmä, mittaukset ja tulokset. Kahdella peräkkäisellä nestekidenäytöllä toteutettiin binääriset AND- ja NAND-operaatiot. Kolmen näytön yhteensä kertolaskusysteemillä toteutettiin binääriset AND OR- ja AND NOR-operaatiot.

Säädettäessä kameran kuvan kontrastia taustaa ei saatu aivan mustaksi. Tämä johtui siitä, että kameran aukko ja GAIN oli säädettävä siten, että valkoinen ruutu oli mahdollisimman kirkas ja häiriötön.

Näytön kennojen johdotus aiheutti diffraktiokuvion, joka on esitetty liitteen C. kuvassa C.1. Koska käytettävissä ei ollut lasidiffuuseria, diffraktiokuvion poistamiseen käytettiin valkoista muovia, jonka paksuudesta johtuen intensiteetti väheni huomattavasti. Muovin tilalla kokeiltiin ohuempaa SCOTH:n heijastamatonta teippiä, mutta sen rakeisuus vaikutti kuvan terävyyteen.

Riippuen siitä, mihin näyttöön kameran kuva tarkennettiin, muiden näyttöjen kuvat olivat epätarkkoja. Sen vuoksi näytöt pyrittiin asettamaan mahdollisimman lähelle toisiaan ja summaavaa säteenjakajaa.

Kun kahden näytön systeemissä näyttöön SLM1 asetettiin valkoinen ruutu ja näyttöön SLM2 samankokoinen musta ruutu, musta ruutu ei peittänytään läpi tulevaa valoa kokonaan, vaan ruudun ympärille jäi valkoinen reuna (Liite C. kuva C.2). Tämä ilmiö johtui siitä, että yhdensuuntainen valo taittui nestekidenäyttöjen lasikuoresta ja/tai säde ei ollut täysin yhdensuuntainen, vaan levisi vielä hiukan. Lineaarisen, AND ja OR LUT:n tulomatriiseissa ilmiö

näky siinä, että valkoiset ruudut ovat suurempia kuin niille määrätty koko ja NAND ja NOR LUT:lla mustista ruuduista tulee suurempia sekä kertolaskusysteemin AND- ja NAND- kuvissa näkyy muutaman pikselin muodostama karmi alkiossa (2, 1). Myös kameran kuvan tarkennuksella oli vaikutusta karmien intensiteettiin ja leveyteen. Projektorin kontrastin, kirkkauden ja värin säädöillä ei ollut merkittävää vaikutusta matriisikuvien tarkkuuteen tai intensiteettiin.

Loogisten operaattoreiden LUT:lla otettujen kuvien matriisit olivat selkeät, vaikka alkioden reunat eivät olleet tasaiset. Kun näitä kuvia verrataan laskettuihin kuviin, huomataan, että lasketuissa kuvissa on enemmän häiriötä. Tämä johtuu siitä, että kamerassa on automaattinen valoisuuden säätö, joka reagoi intensiteetin muutokseen pienentämällä intensiteettiä.

Käytettyjen näyttöjen nopeutta voitaisiin parantaa ohjaamalla niitä erillisellä ohjausyksiköllä ilman projektoria. Videoprojektori on suunniteltu muuhunkin käyttöön kuin syöttämään nopeasti dataa näytölle, joten projektorin muut toiminnot hidastavat näytölle tulostusta. Televisioiden ja projekto-reiden kiertonemaattiset nestekidenäytöt ovat hitaita (60 Hz [24]) verrattuna ferrosähköisiin nestekidenäyttöihin, joiden kuvataajuus on 1 MHz [7].

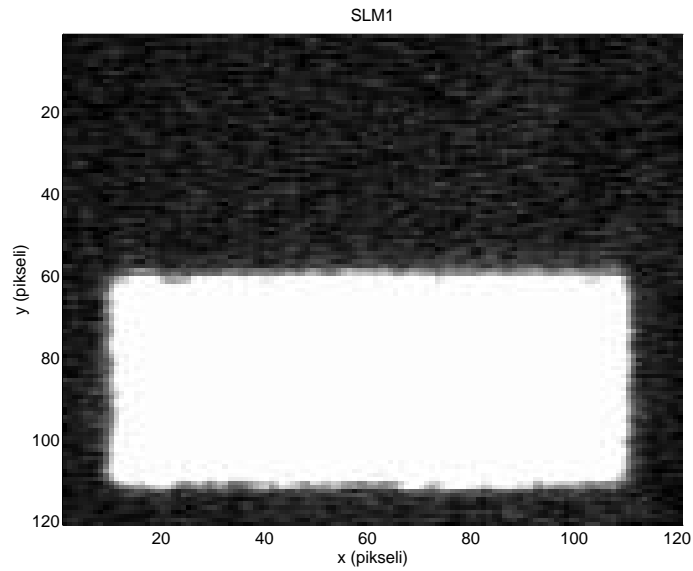
- [1] E. B. Priestley, P. J. Wojtowicz, P. Sheng., *Introduction Of Liquid Crystals.*, RCA Laboratories Princeton, New Jersey, 1975.
- [2] P. Jääskeläinen., *Nestekidenäytöt.*, Otakustantamo, Otaniemi, 1987.
- [3] E. Kaneko., *Liquid Crystal TV Displays.*, KTK Scientific Publishers, Japan, 1987.
- [4] R. Guenther., *Modern Optics.*, John Wiley & Sons Inc., 1990.
- [5] J. S. Patel, J. W. Goodby., "Properties And Applications Of Ferroelectric Liquid Crystals.", *Optical Engineering*, Vol. **26**, 373-384, 1987.
- [6] J. S. Patel., "Electro-Optics Of Ferroelectric Liquid Crystals.", *Optical Engineering*, Vol. **26**, 129-133, 1987.
- [7] K. M. Johnson, G. Moddel., "Motivations For Using Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulators In Neurocomputing.", *Applied Optics*, Vol. **28**, 4888-4899, 1989.
- [8] M. A. Handschy, K. M. Johnson, G. Moddel, L. A. Pagano-Stauffer., "Electro-optic applications Of Ferroelectric Liquid Crystals To Optical Computing.", *Ferroelectrics*, Vol. **85**, 279-289, 1988.
- [9] B. Landert, G. Moddel., "Gray Scale Response From Optically Addressed Spatial Light Modulators Incorporating Surface-Stabilized Ferroelectric Liquid Crystals.", *Applied Optics*, Vol. **31**, 3937-3944, 1992.
- [10] K. Akiyama, A. Takimoto, H. Ogawa., "Photoaddressed Spatial Light Modulator Using Transmissive And Highly Photosensitive Amorphous-Silicon Carbide Film.", *Applied Optics*, Vol. **32**, 6493-6500, 1993.



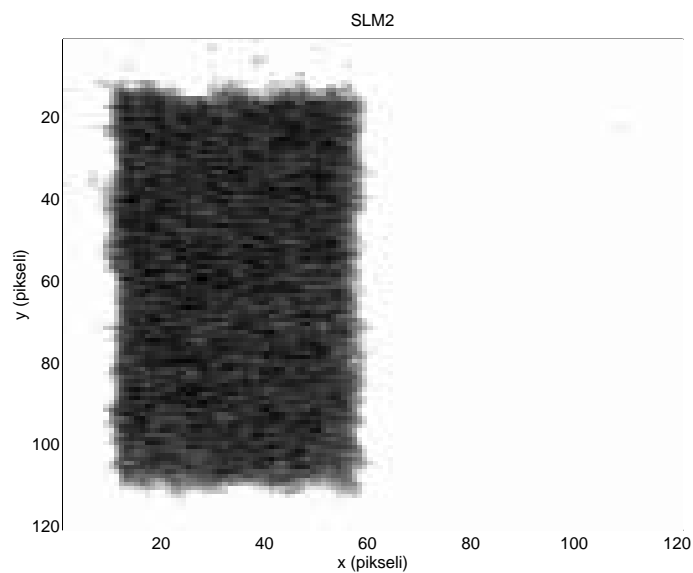
- [11] J. A. Neff, R. A. Athale, S. H. Lee., "Two-Dimensional Spatial Light Modulators: A Tutorial.", *Proceedings Of The IEEE*, Vol. **78**, 826-855, 1990.
- [12] K. Lu, B. E. A. Saleh., "Theory And Design Of The Liquid Crystal TV As On Optical Spatial Phase Modulator.", *Optical Engineering*, Vol. **29**, 240-246, 1990.
- [13] A. Yariv, P. Yeh., *Optical Waves In Crystal.*, John Wiley & Sons, New York, 1984.
- [14] P. K. Das, *Optical Signal Processing.*, Springer-Verlag, Berlin, 1991.
- [15] K. Lu, B. E. A. Saleh., "Complex Amplitude Reflexance Of The Liquid Crystal Light Valve.", *Applied Optics*, Vol. **30**, 2354-2362, 1991.
- [16] P. Yeh, A. Yariv, C. Hong., "Electromagnetic Propagation In Periodic Stratified media. I. General Theory.", *Journal Of The Optical Society Of America*, Vol. **67**, 423-438, 1977.
- [17] H. Sakai, J. Ohtsubo., "Image Subtraction Using Polarization Modulation Of Liquid Crystal Television.", *Applied Optics*, Vol. **31**, 6852-6858, 1992.
- [18] K. Ohkubo, J. Ohtsubo., "Evaluation Of LCTV As A Spatial Light Modulator.", *Optics Communications*, Vol. **102**, 116-124, 1993.
- [19] C. Soutar, K. Lu., "Determination Of The Physical Properties Of An Arbitrary Twisted-Nematic Liquid Crystal Cell.", *Optical Engineering*, Vol. **33**, 2704-2712, 1994.
- [20] H-K. Liu, T-H. Chao., "Liquid Crustal Television Spatial Light Modulators.", *Applied Optics*, Vol. **28**, 4772-4780, 1989.
- [21] D. A. Gregory, J. C. Kirsch, E. C. Tam., "Full Complex Modulation Using Liquid Crystal Televisions.", *Applied Optics*, Vol. **31**, 163-165, 1992.
- [22] J. C. Kirsch, D. A. Gregory, M. W. Thie, B. K. Jones., "Modulation Characteristics Of The Epsom Liquid Crystal Television.", *Optical Engineering*, Vol. **31**, 963-970, 1992.
- [23] F. T. S. Yu, S. Jutamulia, D. A. Gregory., "Real-Time Liquid Crystal TV XOR- And XNOR-Gate Binary Image Substraction Technique.", *Applied Optics*, Vol. **26**, 2738-2742, 1987.

- [24] D. A. Gregory, J. A. Loudin, J. C. Kirsch, E. C. Tam, F. T. S. Yu., "Using The Hybrid Modulating Properties Of Liquid Crystal Television.", *Applied Optics*, Vol. **30**, 1374-1378, 1991.
- [25] M. O. Freeman, T. A. Brown, D. M. Walba., "Quantized Complex Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulators.", *Applied Optics*, Vol. **31**, 3917-3929, 1992.
- [26] S. Fukushima, T. Kurokawa, S. Matsuo, H. Kozawaguchi., "Bistable Spatial Light Modulator Using A Ferroelectric Liquid Crystal.", *Optics Letters*, Vol. **15**, 285-287, 1990.
- [27] C. C. Mao, K. M. Johnson, R. Turner, D. Jared, D. Doroski., "Applications Of Binary And Analog Hydrogenated Amorphous Silicon/Ferroelectric Liquid-Crystal Optically Addressed Spatial Light Modulators.", *Applied Optics*, Vol. **31**, 3908-3916, 1992.
- [28] W. Li, R. A. Rice, G. Moddel, L. A. Pagano-Stauffer, M. A. Handschy., "Hydrogenated Amorphous-Silicon Photosensor For Optically Addressed High-Speed Spatial Light Modulator.", *IEEE Transactions On Electron Devices*, Vol. **36**, 2959-2964, 1989.
- [29] K. M. Johnson, M. A. Handschy, L. A. Pagano-Stauffer., "Optical Computing And Image Processing With Ferroelectric Liquid Crystals.", *Optical Engineering*, Vol. **26**, 385-391, 1987.
- [30] M. Killinger, L. de Bougrenet de la Tocnaye, P. Cambon, R. C. Chittick, W. A. Crossland., "Bistability And Nonlinearity In Optically Addressed Ferroelectric Liquid Crystal Spatial Light Modulators: Applications To Neurocomputing.", *Applied Optics*, Vol. **31**, 3930-3936, 1992.
- [31] D. G. Feitelson., *Optical Computing.*, The MIT Press, 1988.

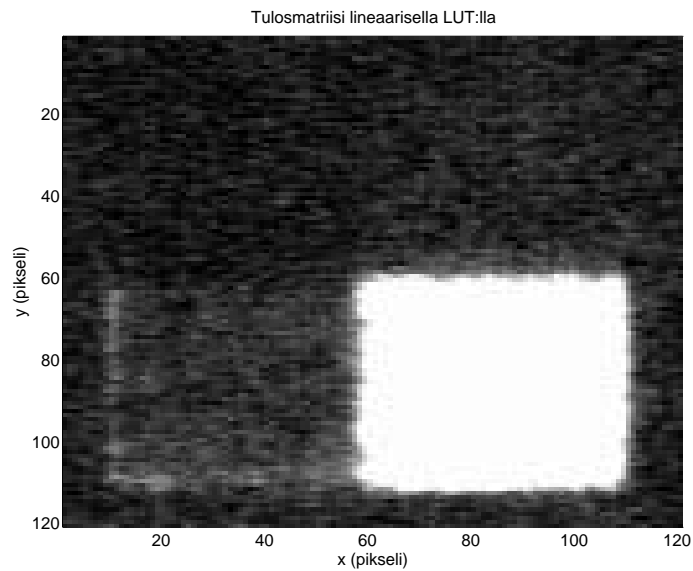
## Optisen kertolaskusysteemin kuvat



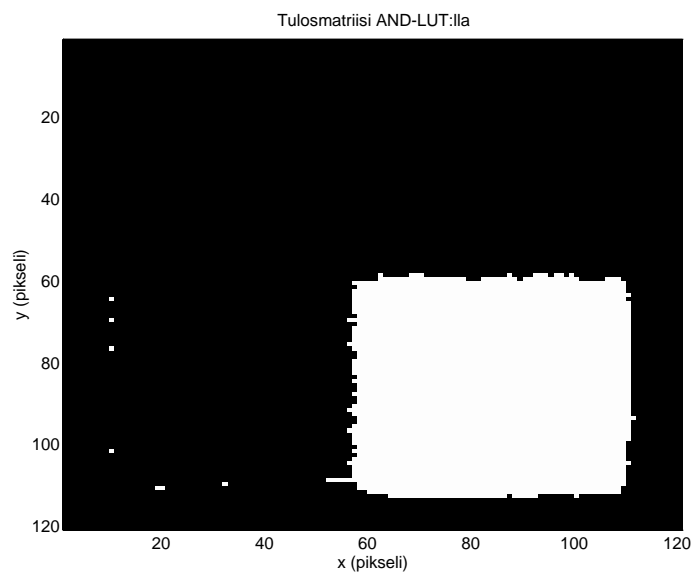
**Kuva A.1:** SML1:n  $2 \times 2$ -matriisi.



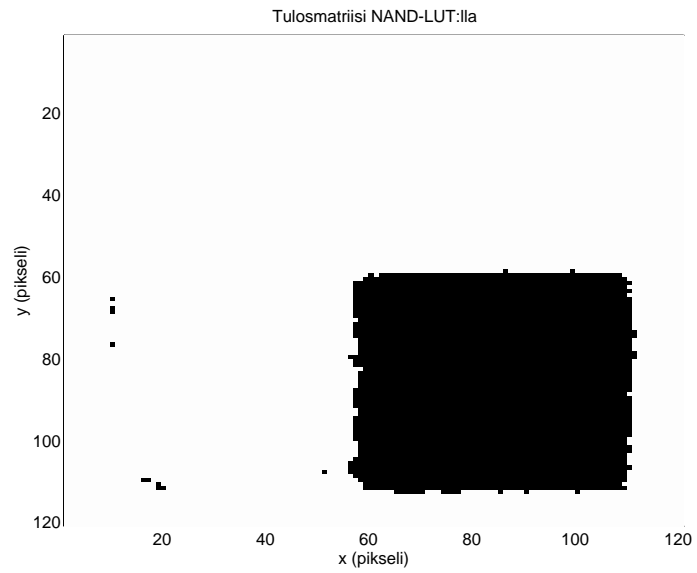
**Kuva A.2:** SML2:n  $2 \times 2$ -matriisi.



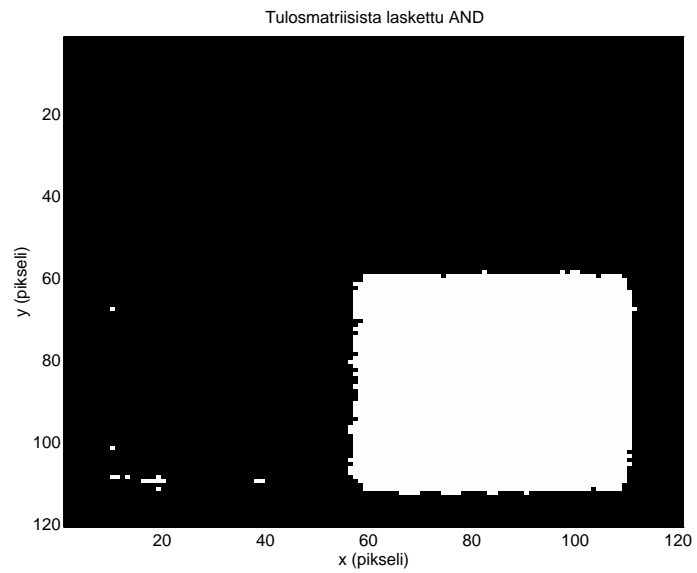
**Kuva A.3:** Lineaarisella LUT:lla kuvattu  $2 \times 2$ -tulosmatriisi.



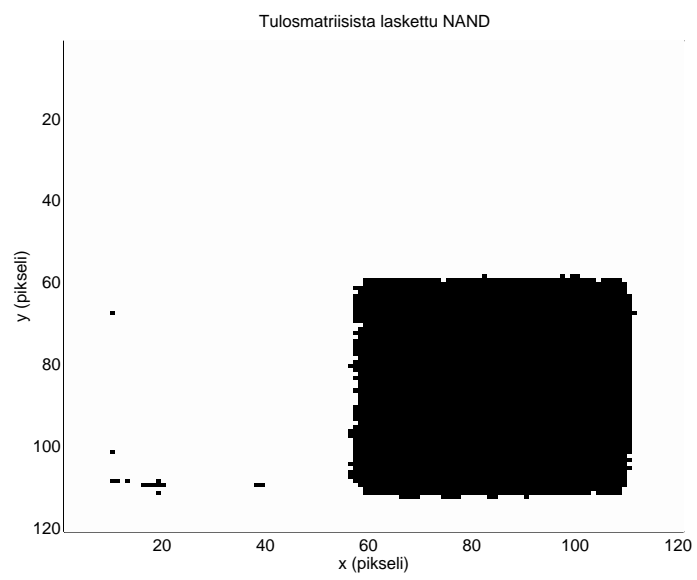
**Kuva A.4:** AND-LUT:lla kuvattu  $2 \times 2$ -tulosmatriisi.



**Kuva A.5:** NAND-LUT:lla kuvattu  $2 \times 2$ -tulosmatriisi.

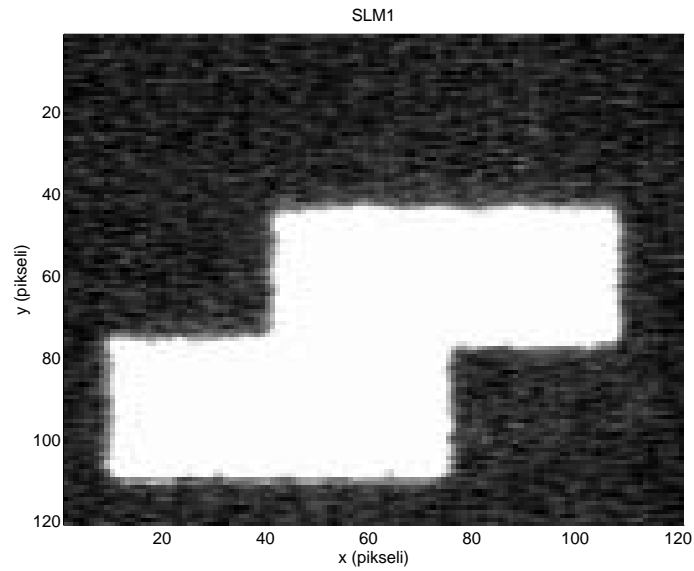
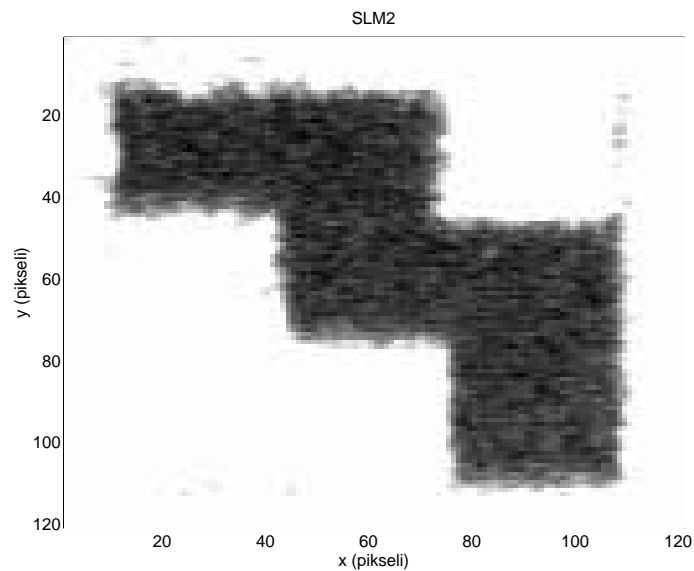


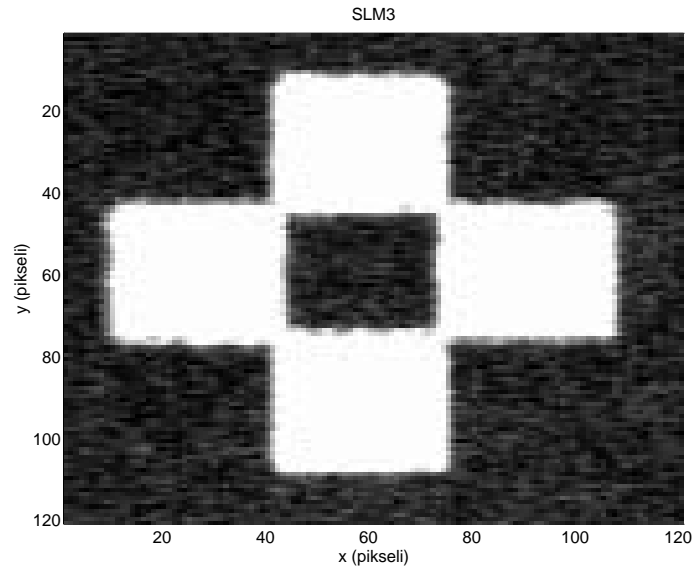
**Kuva A.6:** Tulosmatriisista laskettu AND-kuva.



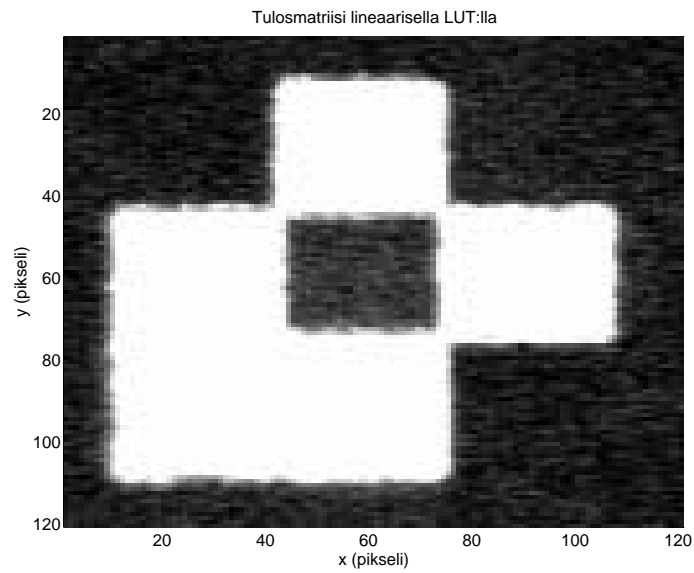
**Kuva A.7:** Tulosmatriisista laskettu NAND-kuva.

## Optisen kerto- ja yhteenlaskusysteemin kuvat

Kuva B.1: SLM1:n  $3 \times 3$ -matriisi.Kuva B.2: SLM2:n  $3 \times 3$ -matriisi.

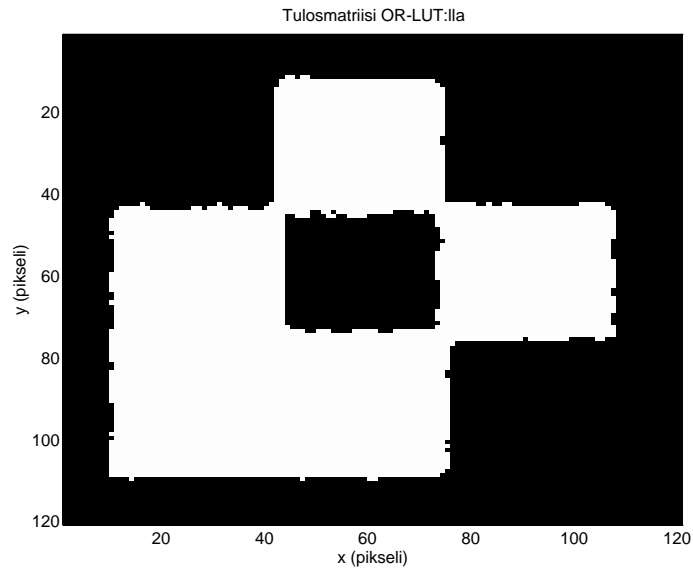


**Kuva B.3:** SLM3:n  $3 \times 3$ -matriisi.

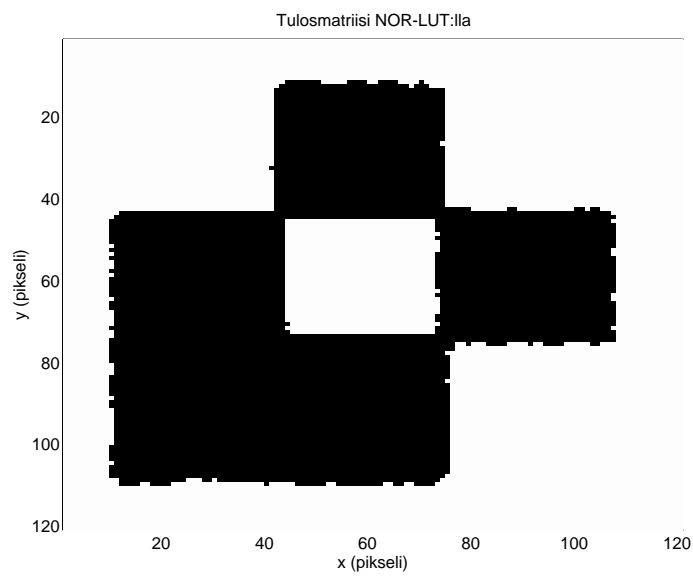


**Kuva B.4:** Lineaarisella LUT:lla kuvattu tulosmatriisi.

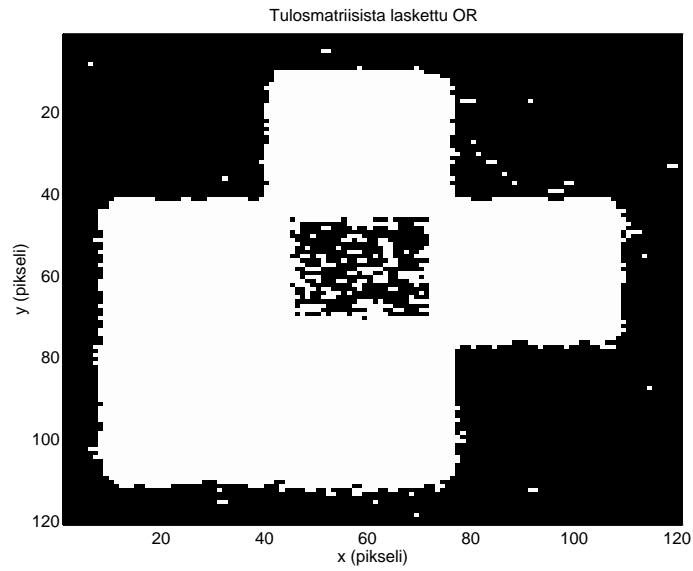




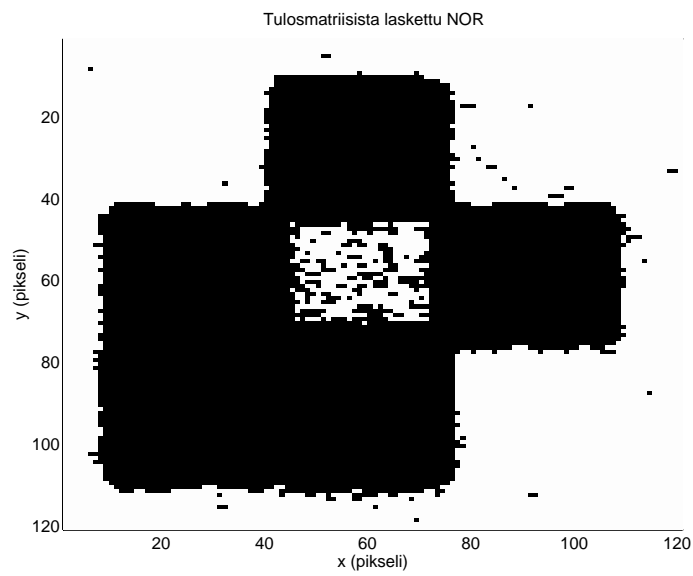
Kuva B.5: OR-LUT:lla kuvattu  $3 \times 3$ -tulosmatriisi.



Kuva B.6: NOR-LUT:lla kuvattu  $3 \times 3$ -tulosmatriisi.

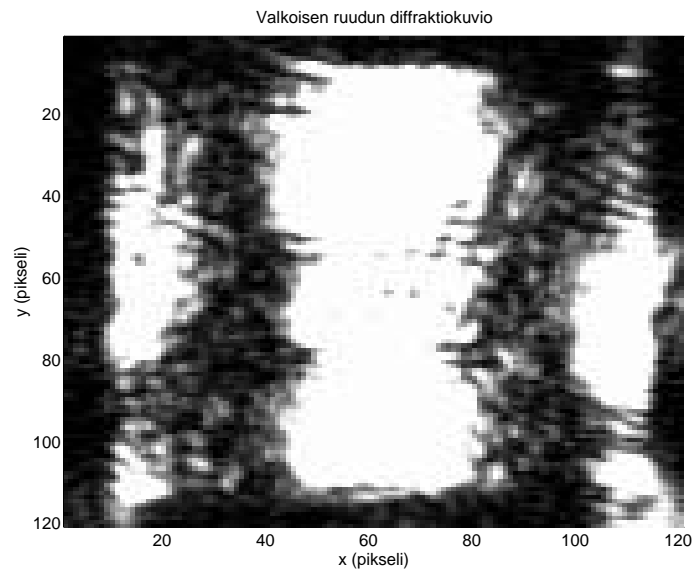


Kuva B.7: Tulosmatriisista laskettu OR-kuva.

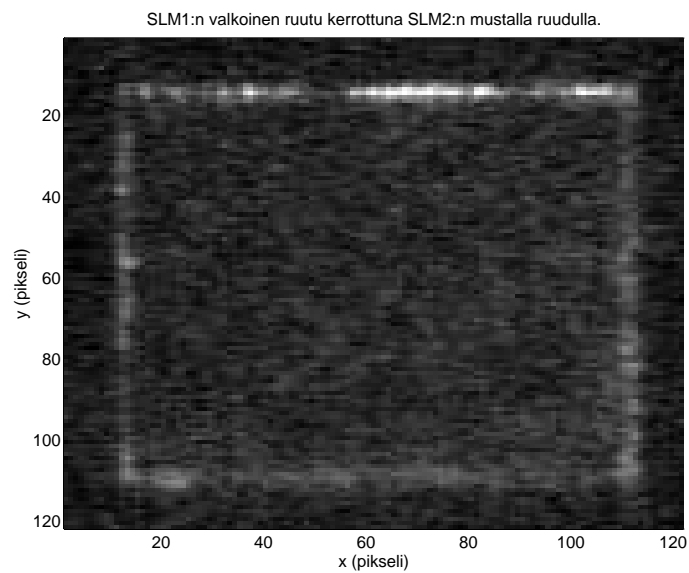


Kuva B.8: Tulosmatriisista laskettu NOR-kuva.

## Diffraktio- ja reunakuvi



**Kuva C.1:** Valkoisen ruudun diffraktiokuva.



**Kuva C.2:** Valkoisen ja mustan ruudun tulo.