

Pockelsin ilmiö

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2026
Aapo Minkkinen
Tarkastaja:
dos. Matti Murtomaa

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

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

Minkkinen, Aapo Pockelsin ilmiö

LuK-tutkielma, 22 s., 3 liites.
Fysiikka
MAALISKUU 2026

Tutkielmassa tarkastellaan sähköoptisen Pockelsin ilmiön historiaa, keskeisiä ominaisuuksia, teoreettista taustaa sekä sovelluksia. Pockelsin ilmiössä materiaalin taiteterroin muuttuu ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Ilmiö esiintyy vain epäsymmetrisissä kiteissä ja kuuluu epälineaarisen optiikan piiriin. Teoriaosuudessa käsitellään ilmiön fysikaalista selitystä materiaalin polarisaation kautta sekä käydään läpi ilmiön matematiikkaa.

Keskeisiä Pockelsin ilmiön sovelluksia ovat erityisesti Pockels-kennot ja elektro-optiset modulaattorit, joita hyödynnetään laajasti laserfysiikassa. Näiden avulla voidaan hallita valon vaihetta, polarisaatiota ja intensiteettiä sekä tuottaa lyhyitä ja voimakkaita valopulseja esimerkiksi optisen kytkennän, kuten Q-kytkennän avulla.

Pockelsin ilmiötä hyödynnetään modernissa ftoniikassa ja sillä on merkittävä rooli optisessa signaalinkäsittelyssä ja laserteknologiassa. Tulevaisuudessa ilmiön merkitys voi kasvaa uusien materiaalien ja sovellusten myötä.

Asiasanat: Pockelsin ilmiö, lineaarinen elektro-optinen ilmiö, elektro-optinen ilmiö, sähköoptinen ilmiö

Sisällys

Johdanto	1
1 Historia	2
1.1 Pockelsin koe	3
2 Teoria	7
3 Käytännön sovelluksia	12
3.1 Elektro-optiset modulaattorit	13
3.1.1 Vaihemodulaattori	13
3.1.2 Polarisatiomodulaattori	13
3.1.3 Intensiiteettimodulaattori	13
3.2 Q-kytkentä	14
3.3 Resonaattorin tyhjennys	16
3.4 Pulssin poiminta	17
3.5 Tulevaisuuden sovelluksia	17
4 Yhteenveto	18

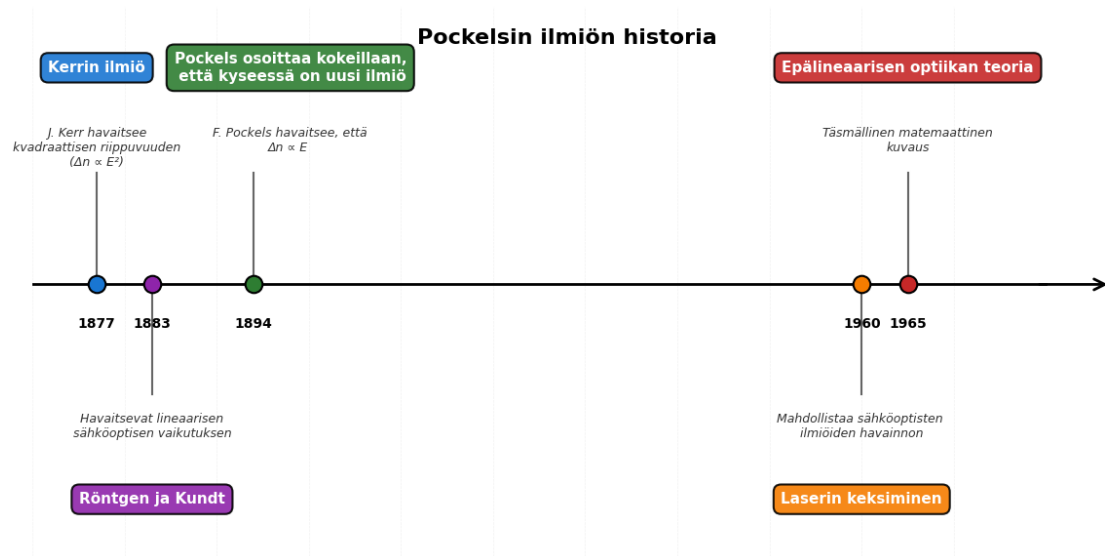
Johdanto

Pockelsin ilmiö on elektro-optiikan ilmiö, joka aiheutuu, kun materiaali altistetaan ulkoiselle sähkökentälle. Ilmiö aiheuttaa muutoksen materiaalin taitekertoimessa, polarisaatiossa sekä myös materiaalin permittiivisyydessä. Taitekertoimen muuttuminen itsessään aiheuttaa silmällä havaittavan ilmiön nimeltä kahtaistaittuminen. Ilmiötä ei kuitenkaan tavata kaikissa materiaaleissa, sillä vain materiaalit, joiden kiderakenne on epäsentrosymmetrinen (engl. noncentrosymmetric) kokevat ilmiön.[1]

Pockelsin ilmiössä materiaalin taitekertoimen muutos on lineaarisesti riippuva materiaaliin altistetusta ulkoisesta sähkökentästä. Tämän takia Pockelsin ilmiötä kutsutaan myös nimellä lineaarinen elektro-optinen ilmiö. Ilmiöstä on myös epälineaarinen versio nimeltään Kerrin ilmiö, jossa taitekertoimen muutos on suoraan verrannollinen sähkökentän voimakkuuden toiseen potenssiin. Kerrin ilmiö on merkittävä myös Pockelsin ilmiön kannalta, sillä John Kerr teki havainnon noin vuosikymmenen ennen Pockelsia. Kerrin ilmiö tapahtuu kaikissa materiaaleissa myös nesteissä, mutta se on huomattavasti Pockelsin ilmiötä heikompi.

Pockelsin ja Kerrin ilmiöt ovat epälineaarisen optiikan ilmiöitä, vaikka Pockelsin ilmiö on lineaarinen sähkökentän suhteen. Epälineaarinen optiikka on ilmiöiden tutkimista, jotka ovat valon aiheuttamia materiaalien optisten ominaisuuksien muutoksia.

Pockels-kenno on merkittävä lineaarisen elektro-optisen ilmiön käytännön sovellus. Pockels-kenno on tärkeä komponentti elektro-optisissa modulaattoreissa, joilla voidaan moduloida monia valon ominaisuuksia, kuten vaihetta, polarisaatiota ja intensiteettiä. Elektro-optisia modulaattoreita hyödynnetään varsinkin laserfysiikassa. [2]

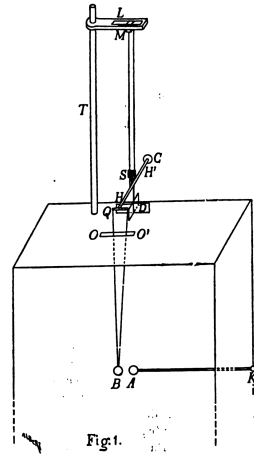


Kuva 1: Aikajana Pockelsin ilmiön historiasta.

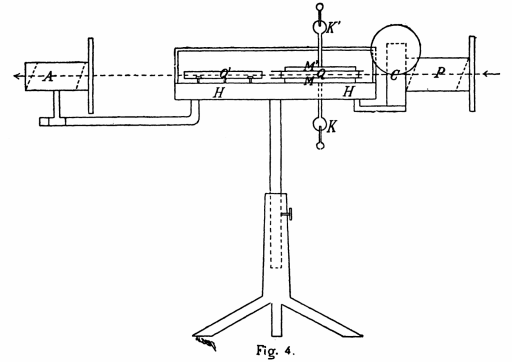
1 Historia

Pockelsin ilmiö havaittiin ensimmäistä kertaa vuonna 1883 Röntgenin ja Kundtin toimesta. He osoittivat, että sähkökenttä muuttaa valon kahtaistaittumista kvartsissa ja olettivat, että ilmiö on pietsosähköisen ilmiön sivuvaikutus (engl. piezoelectric effect). He eivät kuitenkaan antaneet tälle ehdotukselle minkäänlaista kvantitatiivista perustelua. Kymmenen vuotta heidän jälkeen saksalainen Friedrich Carl Alwin Pockels tutki ilmiötä tarkemmin kvartsissa sekä muissa materiaaleissa ja huomasi, että se ei johdu pietsosähköisestä ilmiöstä vaan on täysin eri ilmiö [3]. Pockels julkaisi löydöstään artikkelin vuonna 1894 [4]. Artikkelissa Pockels esitti ilmiön, joka aiheutti muutoksen materiaalin taitekertoimeen lineaarisesti ulkoista sähkökenttää muutettaessa. Pockels ei esittänyt artikkelissa täsmällistä matemaattista mallia ilmiölle, täsmällinen matemaattinen malli ilmiölle kehitettiin vasta 1960-luvulla. [3]

Maria Göppert-Mayer julkaisi väitöstudiumuksensa vuonna 1931, jossa hän ennusti ensimmäisen epälineaarisen optiikan ilmiön [5]. Hänen ideansa pysyivät kuitenkin täysin teoreettisina 1960-luvulle asti, milloin hänen teoreettisesti ennustamansa



(a) Kuva esittää Pockelsin käyttämää elektrometriä, jolla mitataan pieniä varauksia.



(b) Kuvassa on Soleil-Babinet-kompensaattori.

Kuva 2: Pockelsin käyttämiä mittalaitteita. Ote Pockelsin alkuperäisestä artikkelista vuodelta 1894. [4]

kahden fotonin absorptio ilmiö havaittiin. Tämä havainto innosti Nicolas Bloembergenin kehittämään täsmällisen matemaattisen kuvauksen epälineaarisen optiikan ilmiöistä [6]. Tällä Bloembergenin kehittämällä teoreettisella mallilla pystytään myös kuvaamaan jo vuosikymmeniä ennen teorian kehitystä havaitut ilmiöt, kuten Pockelsin ja Kerrin ilmiö. Yksi merkittävistä askeleista epälineaarisen optiikan alan kehityksessä oli ensimmäisen laserin kehitys Theodor Maimanin toimesta 1960-luvun alussa [7]. Tämä edistys mahdollisti Göppert-Mayerin teorian vahvistamisen kahden fotonin absorptio ilmiöstä. Kuvassa 1 on esitetty merkittävimmät edistykset Pockelsin ilmiön historiassa.

1.1 Pockelsin koe

Pockels tutki kokeessaan ulkoisen sähkökentän vaikutusta valon polarisaatioon, kun se kulkee kiteen, kuten kvartsin läpi. Kokeessa pääasiassa mittausrakenteina toimivat Soleil-Babinet-kompensaattori sekä elektrometri (kuva 2). Kuvassa 2b on kaavio

Pockelsin käyttämästä kompensattorista. Kompensaattorilla mitataan valon kahtaistaittumisen määrää eli toisin sanoen, kuinka paljon valon polarisaatio muuttuu. Käytännössä tämä tapahtuu havaitsemalla kompensattorissa tapahtuvan interferenssikuvion muutoksia. [4]

Valo, jonka lähteenä oli natriumlamppu, kulkee kompensattorin läpi oikealta vasemmalle nuolen osoittamasti. Valo kulkee ensin polarisaattorin P (merkitty kuvaan 2b P:llä) läpi. Tämä tehdään sen takia, jotta valo olisi vain yhdessä suunnassa polarisoitunutta, mikä tekee interferenssikuvioista yksinkertaisen ja toisaalta sen muutokset ovat helpommat tulkita. Jatkossa, kun puhutaan komponenteista puhutaan kuvassa 2b olevista kirjaimista ja niitä vastaavista komponenteista ellei toisin mainita. [4]

Seuraavaksi valo kulkee itse kompensattorikomponentin C läpi, millä varsinainen mittausta suoritetaan muuttamalla valon optisen polun pituutta, jonka jälkeen valo kulkee tutkittavan materiaalin Q läpi, mikä on litistetty kahden johtavan messinkilaatan M ja M' väliin. Levyihin asetetaan potentiaaliero elektrodeilla K ja K', joista toinen on maadoitettu ja asetettu potentiaaliero mitataan elektrometrillä 2a. Mitatun potentiaalieron avulla sähkökentän laskeminen on yksinkertaista kaavasta $E = \frac{V}{d}$, jossa V on elektrodien potentiaaliero ja d messinkilaattojen välinen etäisyys. [4]

Seuraavana vuorossa on kompensointilevy Q', joka on samaa materiaalia kuin varsinainen näytekiide Q, mutta on orientoitu eri tavalla, että esimerkiksi kvartsissa havaittu suuri kahtaistaittuminen kumoaisi itsensä ja jäljelle jää vain sähkökentän aiheuttama suhteellisen pieni muutos, mikä parantaa mittausten tarkkuutta. Tämä on verrattavissa matkan mittaamiseen suurella tarkkuudella: jos haluaa mitata matkaa on selvää, että pienemmällä matkalla mittaustarkkuudet ovat pienemmät sen takia, että haluttu mittaustarkkuus on isompi osuus mittaustarkkuudesta ja täten helpompi mitata. Viimeisenä komponentti A on analysaattori, joka yhdistää kiteen luomat

polarisaatiokomponentit yhdeksi, jotta niistä muodostuu interferenssikuvio. [4]

Aluksi mittauksissaan Pockels käytti Riessin elektrometriä, jossa kompensattorin elektrodien potentiaaliero johdetaan kahteen elektrodiin. Elektrodeita siirretään lähemmäs toisiaan, kunnes niiden välinen potentiaaliero purkautuu pienenä salamaana. Tästä on helppo laskea potentiaaliero ilman läpilyöntilujuuden ja elektrodien välisen etäisyyden avulla, tämä metodi aiheuttaa kuitenkin huomattavat virheet potentiaalimittaukseen, joten Pockels päätyi käyttämään toisenlaista elektrometriä. Tarkimmat mittaustulokset potentiaalille ja sähkökentälle Pockels sai kuvan 2a mukaisella laitteella. [4]

Seuraavana viitataan kuvan 2a komponentteihin ja kirjaimiin. Kompensaattorin 2b elektrodista johdettiin potentiaali elektrometrin K elektrodiin, joka oli taas yhdistetty laatikon sisällä olevaan elektrodiin A. Elektrodit oli asetettu laatikon sisälle, jotta ne olisivat mahdollisimman eristetty huoneen ilmajirroista yms. mittausta vaikuttavista tekijöistä, joita on vaikea ottaa huomioon. Pallo B oli maadoitettu ja kannateltu kuparilangoilla vipuvarresta H. Varren H toisessa päässä oli vastapaino C. Koko varsi oli kannateltu kahdella kuparilangalla rautaisesta pystytuesta T, johon langat oli kiinnitetty liikuteltavalla messinkisellä poikkikiskolla L ja pienellä kappaleella M, joka oli tehty samasta materiaalista kuin L. Kuparilankojen väliin oli asetettu pieni peili S, johon heijastettiin valoa seinälle. Tämä helpottaa pienen kulman mittausta, koska kun peili kääntyy jonkin kulman, se kulma, jonka heijastuva säde kääntyy, on kaksinkertainen. Heijastuva valo osui mitta-asteikkoon, joka oli asetettu noin muutaman metrin päähän, josta siirtymä pystyttiin lukemaan millimetriasteikolta. Ulkoisten vaikutusten, kuten ilmajirrosten vähentämiseksi, poikkivarten H oli asennettu alumiinista valmistettu risti, joka oli upotettu laatikon kannen päälle asetettuun astiaan, joka oli täytetty glyseriinillä. [4]

Koska B on maadoitettu ja A:ssa on haluttu potentiaali, aiheutuu B:n pinnalle vastakkaismerkkinen varausjakauma, joka aiheuttaa pallojen välille voiman. Tämä

voima taas aiheuttaa kaksilankaiseen vääntöjouseen momentin $N = (\frac{OUG}{4L} + 2D)\psi = n\psi$, kun kulma ψ lepotilasta on pieni ja L on poikkivarren H ripustuslankojen pituus. G on langoissa roikkuva kokonaismassa ja O sekä U on ripustuslankojen välinen etäisyys ylhäällä ja alhaalla, D taas on yhden langan väännön aiheuttama momentti. Tällöin koko sulussa oleva termi on käytännössä koko systeemin vääntöjousivakio ja yhtälö vastaa tuttua $\tau = -\kappa\theta$ yhtälöä, missä τ on momentti, κ vääntöjousivakio ja θ vääntökulma radiaaneissa. Pallo A on potentiaalissa V , joten pallon B aiheutunut pintavaraus on verrannollinen A:n potentiaaliin, mutta A:n varaus on myös verrannollinen sen potentiaaliin V , joten pallojen välinen voima on verrannollinen A:n potentiaalin toiseen potenssiin $F \propto V^2$. Päästäkseen eroon verrannollisuudesta Pockels ottaa käyttöön verrannollisuuskertoimen $F(e)$, joka on pallojen keskipisteiden etäisyyden funktio ja pallojen säteiden funktio. Saadaan siis momentille $n\psi = lF(e)V^2$, jossa l on puolet varren H, H' pituudesta. Loppujen lopuksi Pockels johtaa pallon A potentiaalille kaavan $V = \sqrt{\frac{n}{lF(e)}\frac{\alpha}{2A}}$, jossa $\frac{\alpha}{2A}$ korvaa ψ termin. Tämä seuraa kulman mittauksen geometriasta, kun peili kääntyy kulman ψ heijastuva valo kääntyy kulman 2ψ , jolloin asteikolla havaittava siirtymä on $\alpha \approx A \tan(2\psi)$, jossa A on etäisyys asteikkoon. Käyttäen tangenttifunktion approksimaatiota pienille kulmille saamme potentiaalin yhtälössä käytetyn kaavan kulman poikkeammalle lepotilasta $\psi = \frac{\alpha}{2A}$. [4]

Pockels otti huomioon monia tekijöitä vähentääkseen potentiaalilaskun virhettä, kuten sen, että varaukset eivät ole pistemäisiä vaan pallomaisia, joilla on kokoa. Tämän hän teki käyttämällä Gustav Kirchhoffin johtamaa sarjakehitelmää $F(e)$ kahden identtisen pallon väliselle vetovoimalle. Hän otti myös huomioon kuinka laatikko, jonka sisällä elektrodit olivat vaikuttivat potentiaaliin ja pallojen väliseen voimaan käyttäen peilivarausmetodia. Pockels havaitsee peilivarausanalyysissään, että ylä- ja alaseinät heikentää pallojen välistä vetovoimaa, kun taas sivuseinämät vahvistavat sitä ja nämä kaksi vaikutusta ovat lähes yhtä suuret ja täten kumoavat toisensa. Hän

myös arvio johtimen, joka tuo palloon A kompensattorista potentiaalin, vaikutusta pallojen väliseen vetovoimaan. Pockels arvioi, että johtimen vaikutus pallojen väliseen voimaan on samaa suuruusluokkaa kuin seinien vaikutus ja hän varmisti tämän myös kokeellisesti. Vähentääkseen johdinlangan vaikutusta Pockels korvasi paksun johdinlangan noin 30 kertaa ohuemmalla johtimella. [4]

2 Teoria

Pockelsin ilmiö liittyy väliaineen polarisoitumiseen, joka vaikuttaa valon etenemiseen ja siten taitekertoimeen. Väliaineen atomit voivat polarisoitua sähkökentän vaikutuksesta, ja polarisaatio kuvaa materiaalissa olevien dipolimomenttien tiheyttä. Valon kulkiessa aineessa elektronit värähtelevät valon sähkökentän vaikutuksesta ja synnyttävät oman sähkökenttensä. Tämä kenttä yhdistyy superpositioperiaatteen mukaisesti alkuperäiseen valokenttään, mikä muuttaa valon etenemisnopeutta materiaalissa ja siten taitekerrointa. [8]

Anisotrooppisessa kiteessä elektronien sidokset ovat suuntariippuvia, jolloin elektronit kokevat erisuuruisia voimia eri suuntiin syrjäytettyinä. Tämän vuoksi valon etenemisnopeus riippuu etenemissuunnasta, mikä aiheuttaa kahtaistaittumisen. Kun kite altistetaan ulkoiselle sähkökentälle, elektronien tasapainopiste siirtyy ja niiden kokema potentiaalikaivo muuttuu. Tämän seurauksena elektronien vaste valon sähkökenttään muuttuu, mikä muuttaa materiaalin polarisaatiota. Koska taitekerroin riippuu väliaineen polarisaatiosta, ulkoinen sähkökenttä muuttaa taitekerrointa eli aiheuttaa Pockelsin ilmiön. [8, 9, 1, 10]

Linearisessa, isotrooppisessa ja homogeenisessä materiaalissa (LIH-materiaali) tapahtuva polarisaatio \mathbf{P} on

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E},$$

jossa ϵ_0 on tyhjiön permittiivisyys, χ on sähköinen susceptibiliteetti ja \mathbf{E} on sähkökenttä [8]. LIH-materiaaleissa χ on skalaari, mutta tämä ei kuitenkaan päde kaikille

materiaaleille. Joidenkin materiaalien sähköinen susceptibiliteetti on epälineaarinen sähkömagneettisen aallon kulkiessa sen läpi. Tällöin väliaineen polarisaatio on seuraavanlainen

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E}^2 + \chi^{(3)} \mathbf{E}^3 \dots)$$

$\chi^{(1)}$:ä suuremmat termit kuvaavat epälineaarista vastetta valon sähkömagneettisen aallon läsnäoloon [11]. Yleisesti susceptibiliteetti on tensori, vain LIH-materiaalien tapauksissa ne ovat skalaareja. Suluissa oleva potenssi tarkoittaa tensorin kertalukua, kolmannen kertaluvun tensori merkittäisiin $\chi^{(2)}$.

Pockelsin ilmiössä materiaali altistetaan ulkoiselle tasasähkökentälle, jolloin sähkökenttä voidaan jakaa kahteen komponenttiin $\mathbf{E} = \mathbf{E}_\omega + \mathbf{E}_0$. \mathbf{E}_0 on ajassa muuttumaton vakiosähkökenttä ja \mathbf{E}_ω on optisen kentän komponentti eli valon aiheuttama komponentti. Kun kenttää käsitellään kahden komponentin summana ja suuremmat epälineaariset termit pienenevät nopeasti otamme huomioon vain kaksi ensimmäistä termiä, tällöin toisen asteen epälineaarinen polarisaatio on

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E}),$$

kun tarkastelemme toisen asteen $\mathbf{E} \mathbf{E}$ termiä saamme $\mathbf{E} \mathbf{E} = 2\mathbf{E}_\omega \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_\omega \mathbf{E}_\omega + \mathbf{E}_0 \mathbf{E}_0$. Otetaan huomioon vain ristitermi $2\mathbf{E}_\omega \mathbf{E}_0$, koska olemme kiinnostuneita siitä, kuinka vakiosähkökenttä muuttaa materiaalin taitekerrointa valon kulkiessa sen läpi, jolloin muut toisen asteen termit voidaan jättää huomioimatta

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\chi^{(1)} + 2\chi^{(2)} \mathbf{E}_0) \mathbf{E}_\omega.$$

Määritetään efektiivinen susceptibiliteetti $\chi_{\text{eff}} = \chi^{(1)} + 2\chi^{(2)} \mathbf{E}_0$, jolloin polarisaatio on

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_{\text{eff}} \mathbf{E}_\omega \text{ [12].}$$

Tässä vaiheessa on hyvä ottaa huomioon tensorien indeksit ja tällä tavalla saamme polarisaation erisuuntaiset komponentit. Tarkastellaan toisen kertaluvun tensoria

saadaksemme intuition tensorien alaindekseista. Toisen kertaluvun tensori on 3×3 tensori, jota voidaan kuvata matriisina, jonka alkiot ovat

$$\chi^{(1)} = \begin{pmatrix} \chi_{xx} & \chi_{xy} & \chi_{xz} \\ \chi_{yx} & \chi_{yy} & \chi_{yz} \\ \chi_{zx} & \chi_{zy} & \chi_{zz} \end{pmatrix}.$$

Merkintä χ_{ij} tarkoittaa i -suunnassa tapahtuvaa polarisaatiota j -suuntaisen sähkökentän vaikutuksesta. LIH-materiaalin tapauksessa vain diagonaalilla on arvoja ja ne ovat yhtä suuret

$$\chi = \begin{pmatrix} \chi_e & 0 & 0 \\ 0 & \chi_e & 0 \\ 0 & 0 & \chi_e \end{pmatrix},$$

tällä matriisilla kertomisella on sama vaikutus kuin skalaarilla kertomisella, ja siksi LIH-materiaalin sähköistä susceptibiliteettiä voidaankin kuvata skalaarina [8]. Kolmannen kertaluvun tensorien indeksit seuraavat samaa logiikkaa. Siis Pockelsin ilmiössä tapahtuva materiaalin toisen asteen polarisaatio suunnassa i tällä indeksimerkinnällä on seuraavanlainen

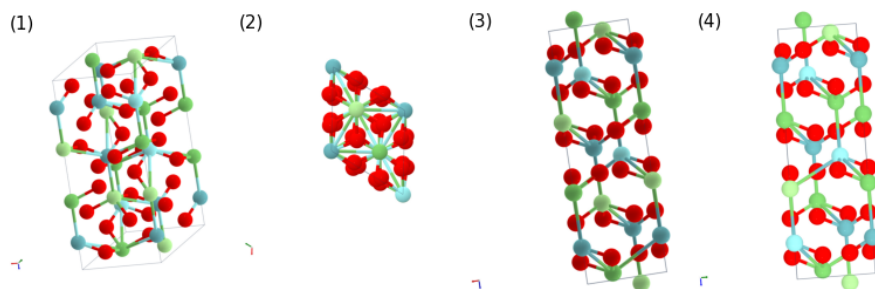
$$P_i = 2\epsilon_0 \sum_{jk} \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k \quad [1].$$

Materiaalin polarisaatio ei ole tärkeää taitekertoimen muutoksen matemaattisessa analyysissä, mutta se on fyysisesti se joka aiheuttaa lineaarisen sähköoptisen ilmiön. Materiaalin taitekerroin ja efektiivinen susceptibiliteetti ovat riippuvaisia toisistaan $n^2 = 1 + \chi_{\text{eff}}$, jos avaamme susceptibiliteetin saamme

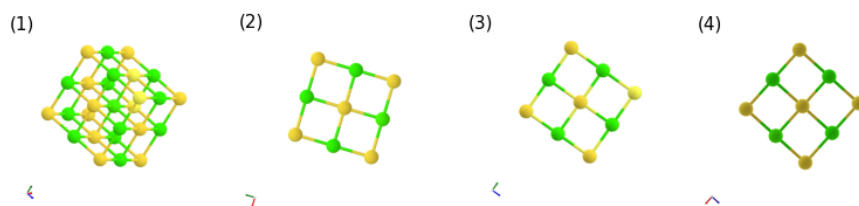
$$n^2 = 1 + \chi^{(1)} + 2\chi^{(2)} E_0.$$

Huomataan, että $1 + \chi^{(1)} = n_0^2$, jossa n_0 on materiaalin lineaarinen taitekerroin eli taitekerroin, kun sähkökenttä ei ole läsnä. Taitekertoimesta n tulee siis

$$n^2 - n_0^2 = 2\chi^{(2)} E_0.$$



Kuva 3: LiNbO_3 :n epäsentrosymmetrinen alkeisrakenne.



Kuva 4: NaCl :n sentrosymmetrinen alkeisrakenne.

Taitekerroin n voidaan esittää lineaarisen taitekertoimen n_0 ja taitekertoimen pienen muutoksen Δn avulla $n = n_0 + \Delta n$ [13]. Ottaen huomioon, että Δn on pieni voidaan tehdä approksimaatio $(n_0 + \Delta n)^2 \approx n_0^2 + 2n_0\Delta n$, jolloin

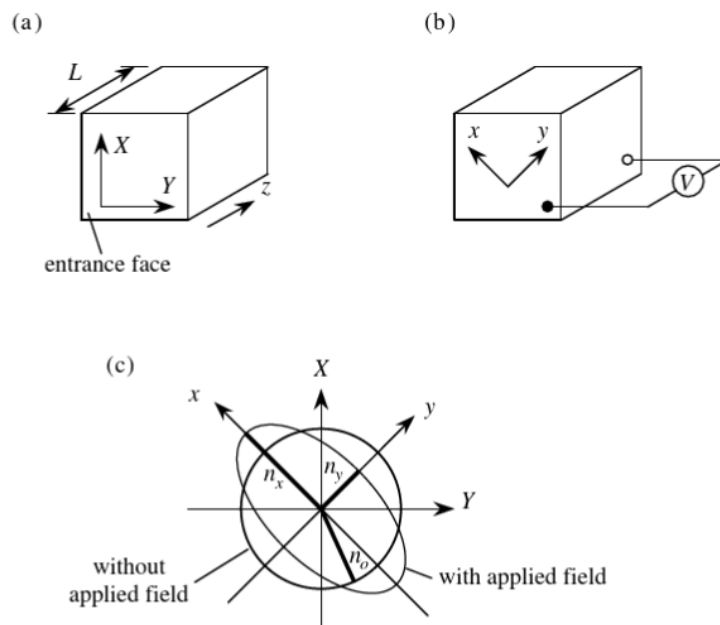
$$\Delta n = \frac{\chi^{(2)}}{n_0} E_0.$$

Tulos osoittaa, että Pockelsin ilmiössä taitekertoimen muutos on lineaarisesti verrannollinen ulkoiseen sähkökenttään E_0 . Yleensä taitekertoimen muutos kirjoitetaan elektro-optiikassa muodossa

$$\Delta n = -\frac{1}{2} n_0^3 r E,$$

jossa r on elektro-optinen kerroin, joka on tensori, mutta tässä muodossa taitekertoimen muutos on tietyssä koordinaatiston suunnassa. [13, 11, 1, 14, 12]

Jotta kide voi aiheuttaa Pockelsin ilmiön, sen täytyy olla epäsentrosymmetrinen. Epäsentrosymmetrisellä kiteellä ei ole inversiosymmetrian keskustaa. Tällaisessa kiteessä ei ole pistettä, jonka suhteen kiteen rakenne on muuttumaton inversion suhteen. Toisin sanoen, että paikkavektoreita \mathbf{r} vastaavat pisteet eivät inversiossa $-\mathbf{r}$ vastaa samaa atomirakennetta. Kuvassa 4 on esitetty natriumkloridin alkeisrakenne,



Kuva 5: Elektro-optinen ilmiö KDP:ssä. a) Optiset akselit ilman sähkökenttää b) Optiset akselit sähkökentän läsnäollessa. [1]

jolla on selkeästi sentrosymmetrinen rakenne, koska minkä tahansa atomin kiteessä voisi valita inversiosymmetrian keskustaksi. Kuvassa 3 esitetyn litiumniobaatin alkeisrakenne on esimerkki kiteestä, jossa ei ole inversiosymmetrian keskustaa ja täten on epäsentrosymmetrinen. Muita kiteitä, jotka osoittavat Pockelsin ilmiön ovat muun muuassa kaliumdivetyfosfaatti (KH_2PO_4), jota kutsutaan myös KDP:ksi ja bariumtitanaatti (BaTiO_3). [1, 14]

Kahtaistaittava kide aiheuttaa sen läpi kulkevaan valoon vaihesiirtymän, tätä on helpoin kuvata lineaarisesti polarisoidulla valolla. Kun lineaarisesti polarisoitu valo kulkee kahtaistaittavan kiteen läpi, valo voidaan jakaa niin sanottujen pääakselien (engl. principal axis) suuntaisiksi komponenteiksi (kuva 5). Toinen näistä akseleista on hidask akseli, eli akseli jolla valo kulkee hitaammin, ja toinen on nopea akseli, jonka suunnassa valo etenee nopeammin. Koska nämä kaksi aaltoa kulkevat nyt eri vaihenopeudella, niiden välille syntyy vaihesiirtymä, joka muuttaa valon polarisaatiota. Pockelsin ilmiö mahdollistaa näiden akselien taitekertoimien säätämistä ja

tästä on hyötyä elektro-optisissa modulaattoreissa. [1, 10]

Anisotrooppisilla kiteillä on niin sanottu optinen akseli (engl. optical axis), kun valo kulkee optisen akselin suunnassa se ei koe kahtaistaittumista. Optinen akseli on merkitty kuvaan 5 z :lla ja X ja Y ovat pääakselit. KDP on uniakσιαalinen kide eli sillä on vain kaksi taitekerrointa, kun valo kulkee optisen akselin suuntaisesti, ja optisen akselin suunnassa nämä taitekertoimet ovat yhtä suuret. Voidaan ajatella, että taitekerroin on joka suunnassa sama, jolloin se muodostaa ympyrän. Tämä ympyrä on osa indeksiellipsoidia (engl. index ellipsoid), joka on geometrinen kuvaus kiteen taitekertoimista kaikissa kiteen suunnissa. Isotrooppisella materiaalilla indeksiellipsoidi on pallo, kuten myös anisotrooppisella aineella valon kulkiessa sen optisen akselin suuntaisesti. Kun kide altistetaan sähkökentälle, pääakselit X ja Y kääntyvät ja indeksiellipsoidin poikkileikkaus optisen akselin suunnassa ei välttämättä ole enää ympyrä vaan ellipsi. Kuvassa 5 on havainnollistettu pääakselien kääntymistä ja indeksiellipsoidin deformaatiota. [1, 10]

3 Käytännön sovelluksia

Pockelsin ilmiön tyypillisin käytännön sovellus on Pockels-kenno, jota hyödynnetään elektro-optisissa modulaattoreissa ja optisissa kytkimissä (engl. optic switch). Pockels-kenno itsestään ja yhdistettynä polarisaattorien kanssa muodostaa elektro-optisen modulaattorin, jolla voidaan moduloida monia valon ominaisuuksia. Elektro-optisia modulaattoreita on monenlaisia, kuten polarisaatiomodulaattori, vaihemodulaattori sekä intensiteettimodulaattori. Optisilla kytkimillä voidaan kontrolloida valon kulkua, pääseekö valo läpi vai ei. Tästä on hyötyä Q-kytkennässä ja resonaattorin tyhjennyksessä, joissa muodostetaan voimakkaita valopulsseja. Nämä ovat tärkeitä tekniikoita lasereille. [15]

3.1 Elektro-optiset modulaattorit

3.1.1 Vaihemodulaattori

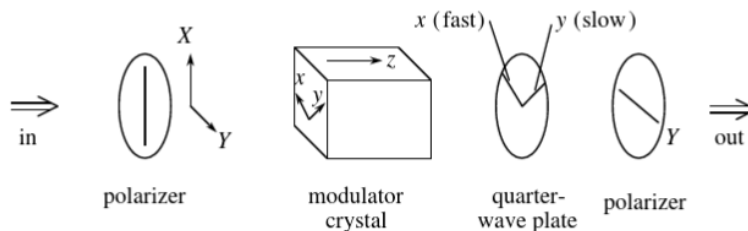
Pockels-kenno itsessään voi toimia vaihemodulaattorina. Käytännössä tämä tapahtuu niin, että sisääntuleva valo on valmiiksi lineaarisesti polarisoitua ja valon polarisaatiosuunta asetetaan kiteen optisen akselin suuntaiseksi, jotta valon polarisaatio ei muutu. Kide altistetaan eri sähkökentille, jotka johtavat eri suuruisiin vaihe-eroihin valossa. Vaihemodulaattoreita käytetään esimerkiksi laserin tai muun optisen laitteen resonanssitaajuuden stabiloinnissa ja taaajuuskampojen (engl. frequency comb) luomisessa. Vaihemodulaattoreita voidaan käyttää myös epäsuorasti intensiteetin säätämiseen interferenssin avulla, esimerkiksi Mach–Zehnder-interferometrissä. [16]

3.1.2 Polarisaatiomodulaattori

Pockels-kennolla voidaan säätää myös valon polarisaatiota, jolloin se toimii jännitteellä säädettävänä aaltolevynä (engl. waveplate). Valon polarisaatio asetetaan usein 45° kulmaan kiteen pääakseleihin nähden, jolloin syntyy kaksi ortogonaalista pääakselien suuntaista komponenttia, joissa valo kulkee eri nopeudella ja syntyy vaihe-ero. Vaihe-eroa voidaan säätää säätämällä sähkökentän voimakkuutta, joka säätää taitekertoimia kiteessä. Jos valon ulostuloon lisätään toinen polarisaattori, joka on eri suunnassa sisääntulopolarisaation nähden, saadaan intensiteettimodulaattori. Jos kennon jännite on satunnainen voidaan luoda polarisaation sekoitin (engl. polarization scrambler), joita käytetään kuituoptiikassa. [16, 1]

3.1.3 Intensiteettimodulaattori

Pockels-kenno yhdistettynä polarisaattorien kanssa voi muodostaa intensiteettimodulaattorin. Polarisaattorit ovat asetettu yleensä 90 asteen kulmaan suhteessa toisiinsa. Valon intensiteettiä voidaan säätää muuttamalla Pockels-kennossa syntyvää vaihe-eroa, joka muuttaa valon polarisaatiotilaa. Valon intensiteettiä on mahdollista



Kuva 6: Esimerkki intensiteettimodulaattorista. [1]

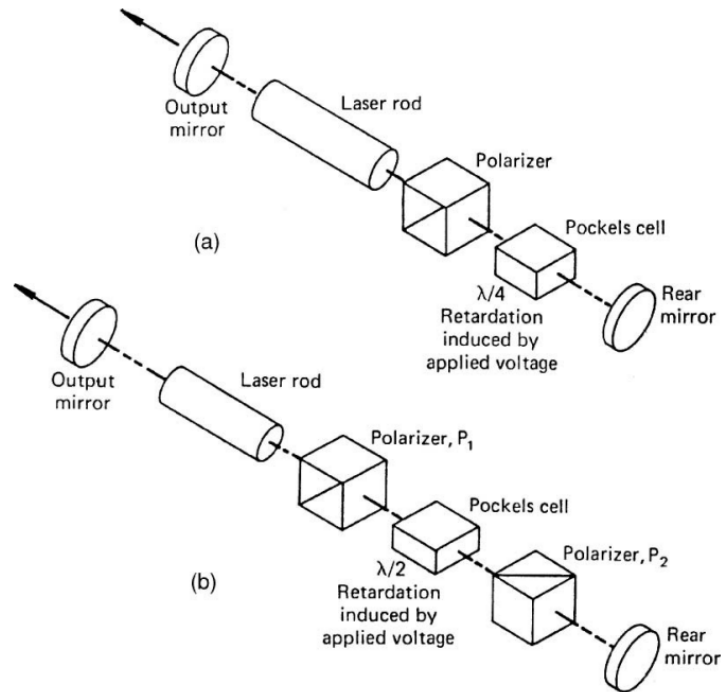
säätää tasaisesti. Kuvassa 6 on yksi esimerkki amplitudimodulaattorista. Kyseisessä modulaattorissa käytetään aaltolevyä, jolloin kennon ollessa pois päältä kaikki valo pääsee läpi, ja kun kennoon säädetään neljännesosa-aallonpituusjännite yhtään valoa ei pääse läpi. [16, 1]

Intensiteettimodulaattoreita voidaan käyttää optisissa kytkimissä, joissa intensiteetin säätö ei ole jatkuvaa vaan ON/OFF tyyppistä ihan kuin valokatkaisija. Kyseisiä kytkimiä voidaan käyttää pulssin poiminnassa ja resonaattorin tyhjennyksessä. [16]

3.2 Q-kytkentä

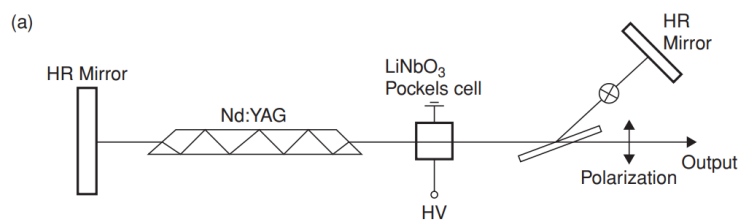
Q-kytkentä on nimetty laserin resonaattorin laatutekijän Q :n mukaan, joka muuttuu Q-kytkennän aikana. Laatukerroin Q määritellään resonaattorin energian ja yhden syklin aikana tapahtuvien energiahäviöiden suhteeksi. Q :n ollessa matala resonaattorin häviöt ovat suuret eikä laserointia tapahdu, samalla kuitenkin energiaa varastoidaan aktiiviseen väliaineeseen. Laserpulsseja tapahtuu, kun häviöitä pienennetään nopeasti, jolloin Q kasvaa ja laserointi käynnistyy. Q-kytkennällä pystytään synnyttämään nanosekunti laserpulsseja, joiden teho voi olla useita megawatteja. [17]

Sähköoptisessa Q-kytkennässä hyödynnetään materiaalin taitekertoimen säätämistä, jotta saavutetaan Q-kytkennälle vaaditut puoli- ja neljäsosa-aaltopituus vaiherot. Kuvan 7 a-osassa valo kulkee polarisaattorin läpi. Polarisaattori tekee valosta lineaarisesti polarisoitua, jonka jälkeen se kulkee elektro-optisen kennon läpi, kenno



Kuva 7: Kaksi yleisintä sähköoptista Q-kytkin järjestelyä käyttäen Pockelsin kennon. [17]

aiheuttaa valoon neljäsosa-aallonpituus vaihe-eron, joka tekee siitä ympyräpolarisoitua. Valo heijastuu takaisin takapeilistä ja kulkee uudelleen kennon läpi, josta se saa toisen neljäsosa-aallonpituus vaiheron, tehden siitä jälleen lineaarisesti polarisoitua, mutta kriittisesti lineaaripolarisaatio on kääntynyt 90° alkuperäisen lineaaripolarisaation suhteen. Koska polarisaation suunta on kääntynyt, valo ei pääse polarisaattorin läpi. Kun kennon jännite asetetaan nolnaan, valo kulkee kennon läpi ilman, että sen polarisaatio muuttuu. Valo pääsee polarisaattorin läpi resonaattoriin laseroivaan väliaineeseen, jossa energia kasvaa entisestään, kunnes laserpulssi tapahtuu. Kuvan 7 b-osassa on kaksi polarisaattoria, jotka ovat asetettu ristiin. Aluksi kennossa ei ole jännitettä, jolloin valo ei pääse kulkemaan P_2 polarisaattorin läpi. Kun kennoon asetetaan jännite, joka aiheuttaa puolikkaan aallonpituuden vaihe-eron, joka vastaa 90° käännöstä lineaarisessa polarisaatiossa, valo pääsee kulkemaan polarisaattorin P_2 läpi. Uudelleen P_2 polarisaattorin läpi kulkiessa valon polarisaatio kääntyy jälleen



Kuva 8: Resonaattorin tyhjentävä Q-kytkin.

90° , joka sallii valon kulkemisen polarisaattorin P_1 läpi ja edelleen resonaattoriin, pienen viiveen jälkeen laserpulssi syntyy. [17]

Q-kytkettyjä lasereita käytetään käytännön sovelluksissa, joissa vaaditaan suuri-tehoisia ja lyhyitä laserpulseja. Q-kytketyllä laserilla voi suorittaa materiaalin prosessointia, kuten poraamista, leikkaamista ja leimausta eli tunnistelijän kaivertamista materiaaliin. Etäisyyden mittauksessa, varsinkin LIDAR-tutkassa eli valotutkassa, käytetään Q-kytkettyjä lasereita. Suuri teho ja lyhyt pulssi tekevät tekniikasta myös sopivan dermatologiseen käyttöön eli ihon laserhoitoon ja myös tatuoinnin poistoon. [18]

3.3 Resonaattorin tyhjennys

Resonaattorin tyhjennys (engl. cavity dumping) on eräänlaista Q-kytkentää, millä voidaan saada noin 10 kertaa nopeampia pulseja kuin aikaisemmin puhutussa Q-kytkennässä. Kuvassa 8 on esitetty resonaattorityhjennetty laseri. Pumpkauksen alussa Pockels kennossa ei ole jännitettä, jolloin se ei aiheuta valoon polarisaatiomuutosta ja se pääsee kulkemaan kalsiitin tai polarisoivan kalvon läpi. Häviöt resonaattorissa ovat suuret, joten laserointia ei tapahdu. Pumpkauksen lopussa kenno säädetään puoliaallonpituusjännitteelle, jolloin valon polarisaatio kääntyy 90° . Tämän kaltainen valo heijastuu kalsiitin/polarisoivan kalvon pinnasta ylös peiliin, josta se kimpoaa takaisin kalsiitin/polarisoivan kalvon pintaan, josta se jatkaa kennon läpi ja edelleen aktiiviseen väliaineeseen. Tässä tilassa resonaattorin häviöt ovat pienet

ja Q kasvaa. Resonaattorin tehon ollessa maksimissa, poistetaan jännite kennosta, jolloin resonaattori tyhjenee yhden syklin aikana. [17]

3.4 Pulssin poiminta

Pulssin poiminta (engl. pulse picking) käyttää sähköoptista kytkintä, jota kutsutaan myös pulssin poimijaksi, poimiakseen yksittäisiä valopulsseja pulssijonosta. Pockels-kennoa käyttävä pulssin poimija koostuu itse kennosta ja polarisaattoreista, ja toimii kuten intensiteettimodulaattori. Suurien pulssienergioiden ja erittäin lyhyiden pulssien saavuttaminen vaatii yleensä pulssijonon toistotaajuuden vähentämistä ja pulssin poimija on yksi tapa vähentää tätä taajuutta. Jotkin resonaattorin tyhjentävät laserit käyttävät pulssin poimijaa. [19]

3.5 Tulevaisuuden sovelluksia

Viime vuosina maailman datavaatimukset ovat kasvaneet eksponentiaalisesti, pääasiassa tekoälyn, median ja suurien tietomassojen takia. Nämä ja monet muut tekijät ovat kasvattaneet optisten lähetin-vastaanottimien kaistanleveysvaatimuksia. Tällä hetkellä pii-pohjaiset modulaattorit ovat yleisiä optisissa lähetin-vastaanottimissa. Pii-pohjaiset modulaattorit perustuvat todella heikkoon vapaiden varauksenkuljettajien dispersioilmiöön (FCD) (engl. free-carrier dispersion). FCD ilmiön heikkouden takia pii-pohjaisten lähetin-vastaanottimien kaistanleveys on rajoitettu noin 60 GHz:iin. [20]

Kaistanleveyden kasvattamiseksi uusia ferrosähköisiä materiaaleja, kuten litiumniobaattia, jolla on saavutettu yli 100 GHz:n kaistaleveyksiä, on tutkittu viime vuosina näihin tarkoituksiin, jonka jälkeen monia muita ferrosähköisiä materiaaleja Pockels-ilmiö modulaattoreissa on kokeiltu. Pockels ilmiön etuja ovat suuret elektro-optiset kertoimet, jotka mahdollistavat ferrosähköisissä materiaaleissa energiatehokkaan moduloinnin pienellä teholla. Lisäksi monilla ferrosähköisillä materi-

aaleilla on erittäin lyhyet vasteajat, jopa alle pikosekunnin, mikä tekee niistä sopivia todella nopeaan optiseen kommunikointiin ja modulaattoreihin. [20]

Pockels-ilmiö modulaattorit ovat esittäneet vaikuttavaa suorituskykyä ja energiatehokkuutta, mitkä voivat olla tärkeässä roolissa seuraavan sukupolven viestintäjärjestelmissä. Näiden modulaattorien käyttö ei rajaannu pelkästään viestintäjärjestelmiin, tällä hetkellä esimerkiksi tutkitaan lineaariseen sähköoptiseen ilmiöön perustuvien modulaattoreiden käyttöä muun muassa kvanttifotoniikassa (engl. quantum photonics), neuroformisissa fotonisissa prosessoreissa (engl. neuromorphic photonic processors), anturitekniikassa sekä satelliittikommunikaatiossa. [20]

4 Yhteenveto

Pockelsin ilmiön havainnosta on jo lähes 150-vuotta. Aluksi luultiin, että ilmiö on pietsosähköisen ilmiön aiheuttama, kunnes Pockels osoitti tutkimuksissaan vuonna 1893, että kysessä on täysin eri ilmiö. Pockelsin ilmiössä materiaalin taitekerroin muuttuu lineaarisessa suhteessa ulkoisen sähkökentän voimakkuuteen. Ilmiö perustuu siihen, kuinka ulkoinen sähkökenttä muuttaa kiteessä atomien ympärillä olevien elektronien paikkaa, mikä vaikuttaa väliaineen polarisaatioon, joka muuttaa taitekerrointa.

Tutkielmassa käytiin läpi ilmiön historiaa, Pockelsin koetta sekä teoriaa ja ilmiön käytännön sovelluksia. Historiassa puhuttiin merkittävimmistä tapahtumista ilmiölle, kuten sen ensimmäinen havaitseminen vuonna 1883, Pockelsin tutkimus vuonna 1893 ja tutkimuksen julkaisu vuonna 1894. Ilmiön täsmällinen teoreettinen formalismi kehiteltiin vasta 1960-luvulla, kun epälineaarinen optiikka sai alkunsa Nicolas Bloembergenin toimesta. Samoihin aikoihin kokeellisia havaintoja epälineaarista ilmiöstä tehtiin ensimmäisen laserin kehityksen ansiosta. Pockelsin koetta ja koe-laitteita käsiteltiin tarkasti. Teoriaosuudessa käytiin läpi, väliaineen polarisaatio ja osoitettiin, kuinka taitekertoimen muutos on suoraan verrannollinen ulkoiseen säh-

kökenttään. Ilmiön käytännön sovelluksia on monia, mutta tässä tutkielmassa käytiin läpi Pockelsin ilmiötä hyödyntävät elektro-optiset modulaattorit, Q-kytkentä, pulssin poiminta sekä resonaattorin tyhjennys. Yksi lupaavimmista ilmiön tulevaisuuden käytännön sovelluksista on lineaarista elektro-optista ilmiötä hyödyntävät modulaattorit, jotka voivat olla merkittävä osa uusia viestintäjärjestelmiä ja tutkimusta suoritetaan moniin muihin sovelluksiin.

Koska ilmiö on tunnettu jo pitkän aikaa voisi luulla, että ilmiöstä tiedettäisiin kaikki tai siitä kehitetyt laitteet olisivat saavuttaneet maksimitehokkuutensa, näin ei kuitenkaan ole. Tutkijat edelleenkin tutkivat Pockelsin ilmiötä uusilla materiaaleilla ja ideoilla, joilla saataisiin tehokkaampia ja suorituskykyisempiä elektro-optisia laitteita.

Tekoälyn käyttö tutkielmassa

Tutkielmassa ei ole käytetty tekoälyä.

Viitteet

- [1] R. W. Boyd, *Nonlinear optics*, 2nd ed. (Academic Press, 2003).
- [2] R. Paschotta, Pockels Effect, RP Photonics Encyclopedia, 2005, https://www.rp-photonics.com/pockels_effect.html, viitattu 5.2.2026.
- [3] S. Katzir, *The Beginnings of Piezoelectricity: A Study in Mundane Physics* (CRC Press / Taylor & Francis, 1995).
- [4] F. Pockels, *Ueber den Einfluss des elektrostatischen Feldes auf das optische Verhalten piezoelektrischer Kristalle* (Abhandlungen der königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttinge, 1894), Vol. 39.
- [5] M. Göppert-Mayer, *Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen* (Annalen der Physik, 1931), Vol. 401, pp. 273–294.
- [6] N. Bloembergen, *Nonlinear Optics*, 4 ed. (World Scientific Publishing Co., 1996).
- [7] T. H. Maiman, *Stimulated Optical Radiation in Ruby* (Nature, 1960), Vol. 187, pp. 493–494.
- [8] R. P. Feynman *et al.*, *The Feynman Lectures on Physics, Volume 2*, 2 ed. (Addison-Wesley, 1964), kappale 10, 31 ja 32.
- [9] L. M. Mentink, *Development and Optimization of a Pockels Effect-Based Diagnostic*, 2022.
- [10] Y. L. Sam, *Surface Charge Measurement by the Pockels Effect*, 2001.
- [11] N. Kamanina, *Nonlinear Optics* (IntechOpen, 2012).
- [12] L. Dalton, *Encyclopedia of Modern Optics* (ElsevierOxford, 2005), pp. 121–129.
- [13] University of Oxford, Nonlinear Optics I: Lecture Notes, https://nmr.physics.ox.ac.uk/oxonly/C2/NL01_2011.pdf, 2011, viitattu 26.3.2026.
- [14] A. Yariv ja P. Yeh, *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications* (Oxford University Press, 2007).
- [15] R. Paschotta, Pockels Cells, RP Photonics Encyclopedia, 2021, https://www.rp-photonics.com/pockels_cells.html, viitattu 17.3.2026.
- [16] R. Paschotta, Electro-optic Modulators, RP Photonics Encyclopedia, 2006, https://www.rp-photonics.com/electro_optic_modulators.html, viitattu 31.3.2026.
- [17] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering, Springer Series in Optical Sciences* (Springer, 2006).

- [18] R. Paschotta, Q-switched Lasers, RP Photonics Encyclopedia, 2005, https://www.rp-photonics.com/q_switched_lasers.html, viitattu 22.3.2026.
- [19] R. Paschotta, Pulse Pickers, RP Photonics Encyclopedia, 2006, https://www.rp-photonics.com/pulse_pickers.html, viitattu 31.3.2026.
- [20] Y. Li *et al.*, *Towards High-Performance Pockels Effect-Based Modulators: Review and Projections*, 2024.