

**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET UNIVERZITETA U BEOGRADU**



**PREGLED TEHNOLOGIJA OPTIČKIH KOMUTATORA**

– Diplomski rad –

Kandidat:

Ivana Marković 2009/325

Mentor:

doc. dr Zoran Čiča

Beograd, 2015.

# SADRŽAJ

<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>2</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>3</b>
<b>2. OPTIČKE TELEKOMUNIKACIJE</b> .....	<b>4</b>
2.1. ISTORIJA .....	4
2.2. RAZVOJ OPTIČKIH TELEKOMUNIKACIJA .....	5
2.3. OPTIČKI KOMUNIKACIONI SISTEMI .....	5
<b>3. OPTIČKI KOMUTATORI</b> .....	<b>7</b>
3.1. OSNOVNE FUNKCIJE OPTIČKIH KOMUTATORA .....	7
3.2. MEMS KOMUTATORI .....	10
3.3. MEHUR ( <i>BUBBLES</i> ) KOMUTATORI .....	13
3.4. TEČNI KRISTALI ( <i>LIQUID CRYSTAL</i> ) .....	14
3.5. HOLOGRAMSKI KOMUTATORI ( <i>HOLOGRAM</i> ) .....	15
3.6. TEČNE REŠETKE ( <i>LIQUID GRATING</i> ) .....	16
3.7. AKUSTO-OPTIČKI KOMUTATORI ( <i>ACUSTO-OPTIC COMMUTATORS</i> ) .....	16
3.8. OPTIČKI KOMUTATORI SA POLUPROVODNIČKIM POJAČAVAČIMA ( <i>SOA</i> ) .....	17
3.9. OPTIČKI KONTROLISANI OPTIČKI KOMUTATORI .....	17
3.10. TERMO-OPTIČKI KOMUTATORI ( <i>TERMO-OPTIC COMMUTATORS</i> ) .....	17
3.11. PRIMENA TEHNOLOGIJA OPTIČKIH KOMUTATORA .....	18
<b>4. PROBLEMI KOJI SE JAVLJAJU KOD OPTIČKIH KOMUTATORA</b> .....	<b>20</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>23</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>24</b>

# 1. UVOD

Telekomunikacione mreže obezbeđuju elektronski prenos svih vrsta podataka (teksta, slike, zvuka, videa, podataka) preko različitih komunikacionih kanala kao što su javna komunikaciona mreža, privatne kablovske mreže, mikrotalasne linije i satelitski prenos. Telekomunikaciona mreža predstavlja skup telekomunikacionih sistema, koji omogućavaju prenos poruka saglasno zahtevima korisnika.

Brzine prenosa u WDM (*Wavelength Division Multiplexing*, tehnika koja se koristi za multipleksiranje signala po talasnim dužinama) sistemima su reda Tb/s i više, kako bi omogućile prenos sve veće količine podataka. Pošto se koriste optički linkovi za ostvarivanje velikih protoka u prenosu signala, cilj je da i mrežni čvorovi postanu optički, tj. da signal ostane u optičkom domenu i da se u njemu vrši procesiranje unutar mrežnog čvora. Razlog je što električni domen ima nižu brzinu u odnosu na optički domen, a isto tako i u slučaju visokih protoka i velikog broja portova, broj linija unutar mrežnog čvora je ogroman, kao i energetska potrošnja čvora, pri čemu dolazi i do elektromagnetskih smetnji između linija što komplikuje izradu mrežnog čvora. Tako da postoji opasnost da komutacija u električnom domenu postane prepreka za dalje povećanje kapaciteta mrežnih čvorova i prepreka za povećanje brzina prenosa koje se ostvaruju u optičkom domenu. Mrežni čvorovi moraju da vrše funkciju komutacije tj. usmeravanja saobraćaja ka odredištima. To usmeravanje zahteva konverziju optičkih signala u električni domen, pomoću konvencionalnih namenskih kola ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*) koja omogućavaju komutaciju pre ponovne konverzije u optičke signale kako bi se dalje slali kroz mrežu.

Optički komutator je uređaj koji omogućava prespajanje optičkih vlakana, vlakno sa ulaznog i izlaznog porta na komutatoru. Komutatoru treba kontrolna informacija kako bi doneo odluku o komutiranju. Kod elektronskih komutatora, ova informacija se prenosi unutar paketa. Optički komutator je analogni mehanički uređaj i on ne može primiti tu informaciju. U pasivnim optičkim mrežama se koriste optički komutatori, dok se u aktivnim koriste komutatori koji pretvaraju optički signal u električni, a zatim ponovo u optički. Optički komutatori su značajni zato što rade sa svetlosnim zracima koje prosleđuju sa ulaznog na izlazni port.

Ostatak rada je organizovan na sledeći način: u drugom poglavlju se obrađuje istorijat, evolucija optičkih telekomunikacija, kao i karakteristike optičkih komunikacionih sistema. Treće poglavlje opisuje osnovne funkcije optičkih komutatora. Ovo poglavlje pokriva različite tipove optičkih komutatora, gde im je mesto u mrežama, koje funkcije izvršavaju, njihove brzine komutiranja, skalabilnost, pouzdanost, gubitke, energetska potrošnja i primere primene. Četvrto poglavlje se bavi opisom problema koji mogu nastati implementacijom optičkih komutatora. U petom poglavlju je zaključak u kome se naglašava da su optički komutatori veoma izazovna tema za istraživanje, jer se veruje da će se usavršavanjem njihovih tehnologija postići cilj stvaranja potpuno optičkih mreža.

## 2. OPTIČKE TELEKOMUNIKACIJE

Optičke telekomunikacije predstavljaju veoma značajnu oblast savremenih telekomunikacija. One su se intenzivno počele razvijati u drugoj polovini 20. veka i od tada njihov razvoj neprestano traje. Ranije su se koristili različiti postupci za prenos podataka koji su korisnicima bili vidljivi kao što su signalizacija, svetionici, zastavice... Interesantan je bio francuski telegrafski sistem koji je vršio prenos podataka na udaljenosti od 200 km, a vreme koje je bilo potrebno za prenos tih podataka je bilo oko 15 minuta.

### 2.1. Istorijat

Jedan od prvih optičkih sistema se zasnivao na sistemu semafora koji su bili montirani na kulama, preko kojih je operater prosleđivao poruke sa jedne kule na drugu [1]. Sredinom 19. veka ovaj sistem je zamenjen savremenim električnim telegrafom. Brzina protoka je bila 1 b/sec. Alexander Graham Bell je 1880. godine patentirao optički telefonski sistem "Photophone", ali se ipak mnogo praktičnijim pokazao njegov stariji izum, telefon. Bell je razmišljao kako i na koji način da šalje optičke signale kroz atmosferu, ali je shvatio da je ta transmisija manje pouzdana od one posredstvom električnih vodova. Vođenje svetlosti kroz vodene mlazove takozvanim svetlosnim fontanama i svetlosnim vodovima demonstrirali su švajcarski fizičar Jean-Daniel Colladon i francuski fizičar Jacques Babinet. Na efekat vođenja svetlosti putem vodenog mlaza ukazivao je i britanski fizičar John Tyndall 1854. godine.

Između 19. i 20. veka pronalazači su otkrili da savijeni kvarcni štapovi mogu efikasno prenositi svetlost, pa su ih patentirali kao zubne iluminatore. Mnogi lekari su ih koristili za pregled grla. Ideja, o upotrebi šupljih cevi i transparentnih šipki u prenosu televizijskih slika i faksimila, je zaživela tokom dvadesetih godina kada su se pojavili i prvi patenti zasnovani na ovoj ideji. Nemački lekar Heinrich Lamm je bio prvi koji je realizovao ovu ideju. Da bi zavirio u nedostupne delove tela koristio je staklena vlakna vezana u snop. Reč je o prvom endoskopu. 1954. godine su Abraham von Heel i Harold H. Hopkins su istovremeno napisali odvojene radove u kojima su prezentovali snopove za prenos slike. Njihova vlakna su bila presvučena transparentnim slojem sa nižim indeksom prelamanja. Vremenom su telekomunikacioni inženjeri istraživali na koji bi način mogli da povećaju propusni opseg. Sam vrhunac tehnologije su bili sistemi koji su bazirani na milimetarskim talasima, koji su vođeni putem šupljih cevi. Optički pojačavač, baziran na stimulisanj emijisi, takozvani LASER pojavljuje se jula 1960. godine.

Optički talasovodi nisu bili efikasni. Vlakna sa jezgrom koja su mogla da prenose svetlost u jednom talasovodnom modu proizveo je 1961. godine Elias Snitzer iz American Optical-a. Ovakav način rada nije bio ozbiljno shvaćen, jer je slabljenje bilo 1dB/m, a za komunikaciju na velike daljine maksimalno dozvoljeno slabljenje je 10-20 dB/km. Tim iz *Standard Telecommunication Laboratories* nije odustao od optičkih vlakna. Antoni Karbowiak i Charles Kao su ustanovili da optičko vlakno (staklo) samo po sebi nije odgovorno za slabljenje već nečistoće u njemu. U časopisu *Laser Focus* 1966. godine se objavljuje rad u kome se navodi da se gubici u vlaknima mogu spustiti ispod kritičnih 20 dB/km [3]. Ubrzo nakon toga su laboratorije počele da rade na navedenom problemu slabljenja. Četiri godine je trajalo istraživanje niskoapsorpcionih vlakna, da bi septembra 1970. godine svoje vlakno predstavio Corning Glass Works (danas Corning Inc.) na

talasnoj dužini od 633nm (HeNe laser) koje je imalo slabljenje 20 dB/km. Očigledno, problemi koji su se rešavali na početku razvoja optičkih telekomunikacija su bili: slabljenje na vezama između kablova i slabljenje usled propagacije.

## 2.2. Razvoj optičkih telekomunikacija

U komercijalnu upotrebu 1980. godine puštena je prva generacija optičkih komunikacionih sistema koja je radila na talasnoj dužini  $\lambda=0.8 \mu\text{m}$  sa protokom od 45 Mb/s i dometom 10 km [1].

Druga generacija, koja je puštena u komercijalnu upotrebu 1987. godine, radila je na talasnoj dužini  $\lambda=1.3 \mu\text{m}$  pri protoku od 1.7 Gb/s i dometom 50 km. Gubici na  $1.3 \mu\text{m}$  su bili 0.5 dB/km. Na  $1.55 \mu\text{m}$  oni su iznosili 0.2 dB/km, ali se javljala velika disperzija. Problem disperzije je rešen korišćenjem vlakana sa pomećenom disperzijom i ograničavanjem spektra signala iz lasera na samo jedan longitudinalni mod [1].

Treća generacija je radila na  $1.55 \mu\text{m}$ , i podržavala je protok 2.5 Gb/s i domet oko 100 km, ali je imala nedostatak jer se signal obnavljao periodično, na svakih 60, 70 km posredstvom regeneratora, koji su konvertovali optički signal u električni i obrnuto i time ograničavali brzinu prenosa i povećavali cenu celog sistema.

Četvrta generacija optičkih sistema je koristila optičke pojačavače i tehniku multipleksiranja po talasnim dužinama WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) čime se protok značajno povećao. Takođe, iskorišćena su i erbijum (Eb) vlakna čime su smanjeni gubici. Podržana je bila mogućnost prenosa podataka preko 21 000 km brzinom od 2.5. Gb/s, odnosno 14 300 km brzinom od 5 Gb/s. Ovim rezultatom došlo se na ideju interkontinentalne komunikacije. Naglasak četvrte generacije je bio na povećanju kapaciteta sistema prenosom više kanala upotrebom WDM tehnike. Jedna demonstracija je pokazala prenos 20 kanala po 5 Gb/s preko 9100 km što ukupno daje protok od 100 Gb/s i proizvod  $B*L=910 \text{ (Tb/s)*km}$  (gde je B širina propusnog opsega, a L domet). Treba napomenuti da je, u razvoju optičkih telekomunikacionih sistema, upravo povećanje ovog proizvoda glavna težnja. Ovaj proizvod je počeo od 1 (Gb/s)\*km, da bi danas dostigao preko 100000 (Gb/s)\*km.

Peta generacija optičkih komunikacionih sistema se najviše bavila problemom disperzije u vlaknu.

Trenutno, novi koncept predstavljaju optički solitoni, tj. optički impulsi koji zadržavaju svoju formu pri propagaciji tako što se kompenzuje uticaj disperzije kroz nelinearne efekte vlakna. Do 1994. godine solitoni su omogućavali prenos brzinom od 10Gb/s pri čemu je domet prenosa veći od 35 000 km, kao i prenos brzinom od 15Gb/s pri čemu je domet prenosa veći od 20 000 km. Pomenimo i eksperiment korišćenja solitona za prenos signala na razdaljinu od 9400 km pri čemu je ostvaren protok od 70 Gb/s (multipleks 7 kanala od 10 Gb/s).

## 2.3. Optički komunikacioni sistemi

Optički komunikacioni sistemi se sastoje od predajnika (koji prevodi podatke u optički signal koji potom šalje u kanal), komunikacionog kanala (koji predstavlja komunikacionu vezu ili put preko kog se podaci prenose od predajnika ka prijemniku) i prijemnika (koji prihvata i detektuje optičke signale iz kanala i konvertuje ih u odgovarajući oblik pre prosleđivanja korisniku) (slika 2.3.1.). Optički signal se iz optičkog predajnika šalje preko komunikacionog kanala koji je

sastavljen od optičkih vlakana i optičkih pojačavača sve do optičkog prijemnika. Optički komunikacioni sistemi mogu biti vođeni i nevođeni.



Slika 2.3.1. Optički komunikacioni sistem [1]

Kod vođenih sistema karakteristično je da se emitovani optički signal prilikom prenosa ograničava optičkim vlaknima i optičkim pojačavačima i takav sistem se naziva fiber optički sistem [1]. Kod nevođenih sistema se emitovani signal transmituje u slobodnom prostoru. Reč je o tzv. *free space* komunikacijama.

Komponente fiber optičkog telekomunikacionog sistema su [1]:

- Optičko vlakno
- Optički predajnik
- Optički prijemnik

**Optičko vlakno:** to je vlakno koje se sastoji iz optički čistog materijala sa određenim dodacima kojih mora biti u veoma malim količinama kako se ne bi narušila optička svojstva materijala, npr. stakla.

**Optički predajnik:** njegova uloga je da izvrši konverziju električnog signala u optički signal (tj. svetlost) i da izvrši njegovu transmisiju u optičko vlakno. Modulisanje optičkog signala moguće je vršiti direktno ili uz pomoć modulatora.

**Optički prijemnik:** Iz optičkog vlakna na ulaz u optički prijemnik pristiže optički signal. Glavni zadatak optičkog prijemnika je da izvrši konverziju signala iz optičkog u električni domen.

Komunikacioni sistemi prenose informacije s jednog mesta na drugo, bez obzira da li je rastojanje nekoliko kilometara ili transokeansko rastojanje. Nosilac informacije u savremenim telekomunikacionim sistemima su elektromagnetski talasi. Ovi elektromagnetski talasi se manje-više kreću istim brzinama, ali je ono što ih suštinski međusobno razlikuje brzina ili učestanost oscilacija elektromagnetskog polja. Tako bržim oscilacijama odgovaraju više učestanosti, a sporijim niže. U zavisnosti od toga o kakvoj telekomunikacionoj tehnologiji se radi, drugačija je učestanost elektromagnetskog talasa. Frekvencija varira od nekoliko megaherca MHz do nekoliko stotina teraherca THz. Elektromagnetski talasi u optičkim telekomunikacijama su vrlo bliskim onim talasima koje ljudsko oko može da vidi (vidljivi deo spektra), a koje nazivamo svetlost. Telekomunikacioni sistemi koji koriste više učestanosti obično imaju veći informacioni kapacitet tj. mogućnost prenosa veće količine informacija u jedinici vremena. Upravo ta visoka učestanost elektromagnetskog talasa omogućava da se talasi uobličavaju u izuzetno kratke optičke impulse ili signale, zbog čega je broj signala koji se prenose kroz sistem u istom vremenskom periodu daleko veći nego kod drugih telekomunikacionih tehnologija. Često, primljeni signal je u formi impulsa i on se direktno konvertuje u električnu struju. Ova tehnika je poznatija kao IM/DD (*Intensity Modulation with Direct Detection*) u kojoj je koristi intenzitetska modulacija, a na prijemu se vrši detekcija optičkog signala.

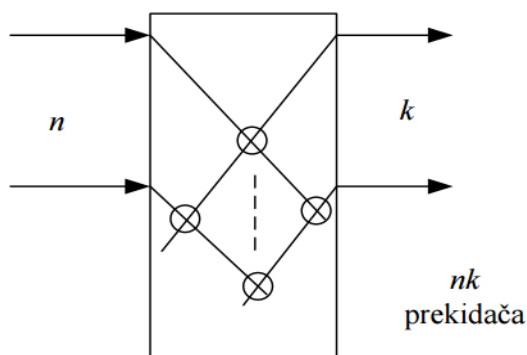
### 3. OPTIČKI KOMUTATORI

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju prenos u optičkom domenu omogućava postizanje značajno većih brzina nego prenos u električnom domenu. Otuda je cilj da se kreiraju potpuno optičke mreže u okviru kojih bi se prenos signala u potpunosti odvijao u optičkom domenu. Da bi tako nešto bilo ostvarivo neophodno je kreirati optičke komutatore koji bi komutaciju vršili u optičkom domenu. Podsetimo se da je uloga komutatora da prosleđuju podatke sa ulaza na odgovarajuće izlaze čime se omogućuje da podaci prolazeći kroz mrežu dođu do željenog odredišta.

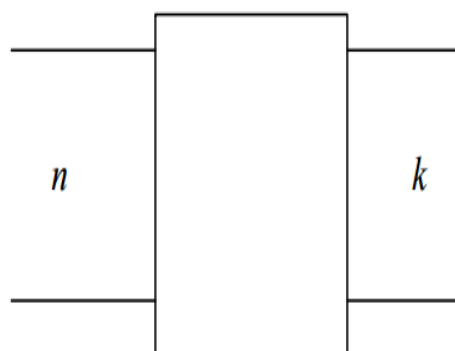
#### 3.1. Osnovne funkcije optičkih komutatora

Komutacija predstavlja uspostavljanje pojedinačne veze na zahtev od željenog ulaza do željenog izlaza iz skupa ulaza i izlaza za vreme željenog prenosa informacija [4]. Optičke komutacione mreže koriste optičke tehnologije komutiranja za usmeravanje saobraćaja. Mogu biti jednokanalne (*single-channel*) i višekanalne (*multi-channel*). Njihova konfiguracija se može menjati dinamički u zavisnosti od saobraćaja i kvarova na mreži. Današnje komutacijske tehnologije rade na brzini od 40 Gb/s, a u optičkim vlaknima kapacitet je 10 Tb/s. Ranije, celokupna komutacija i procesiranje podataka je bilo realizovano u električnom domenu nakon što se signal iz optičkog domena prebaci u električni domen. Sada se polako počinju koristiti i optički komutatori koji proces komutacije vrše u optičkom domenu, pri čemu se ovakvi komutatori prvenstveno koriste u optičkim mrežama zasnovanim na komutaciji kola.

Optički komutator (prekidač) je uređaj koji uspostavlja ili prekida vezu (konekciju) između optičkih transmisionih putanja u komunikacionim sistemima ili sistemima za obradu signala.

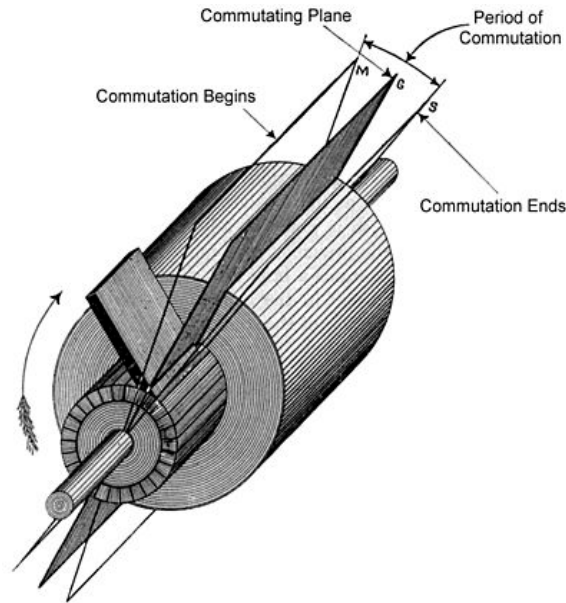


Slika 3.1.1. Optički komutator sa  $n$  ulaza i  $k$  izlaza [5]



Slika 3.1.2. Simbol komutatora [5]

Na slici 3.1.3. je prikazan optički komutator koji ima aksijalno-radijalnu konfiguraciju. Dolazni optički kabl ima aksijalnu dispoziciju, a odlazni optički kabl ima radijalnu dispoziciju. Središte ovog komutatora je ogledalo koje vrši komutaciju. Ogledalo može biti podesivo u zavisnosti od toga kako se optički signal (svetlost) kreće od dolaznog ka odlaznom optičkom kablju. To ogledalo predstavlja komutator. Proces komutacije započinje u samom središtu optičkog komutatora gde se, takođe, vidi period komutacije kao i gde se komutacija završava.



**Slika 3.1.3. Optički komutator [6]**

Optički komutatori su veoma prilagodljivi. Današnje komutacijske tehnologije rade na maksimalnoj brzini od 40 Gb/s, a maksimalan raspoloživ kapacitet optičkog vlakna je oko 50 Tb/s, što je skoro 4 reda veličine veće od brzine procesiranja električnom domenu.

#### **Karakteristike optičkih komutatora [4]:**

- Veličina (broj ulaza i izlaza) i usmerenje (unidirekciono ili bidirekciono)
- Vreme komutacije (vreme potrebno za rekonfiguraciju)
- Kašnjenje kroz komutator
- Propusni opseg (maksimalna brzina kojom podaci prolaze)
- Energija potrebna za konfiguraciju
- Disipirana snaga u procesu komutacije
- Gubici pri sprezanju
- Preslušavanje
- Fizičke dimenzije.

S komutatori su prostorni komutatori koji se sastoje od prekidača i kontrolne ravni koja kontroliše te prekidače [5]. Realizacija prekidača predstavlja jedan od najvećih izazova prilikom realizacije potpuno optičkih komutatora, i u nastavku teksta će biti razmatrana različita tehnološka rešenja optičkih komutatora.

Vrste optičkih komutatora komutatora u pogledu konverzije i komutiranja [4]:

- S komutatori sa električnom konverzijom i električnim komutiranjem gde se na ulazu komutatora vrši konverzija iz optičkog u električni domen, u samom komutatoru se odvija komutacija u električnom domenu, a na izlazu se vrši konverzija signala iz električnog u optički domen, što je ilustrovano na slici 3.1.4.





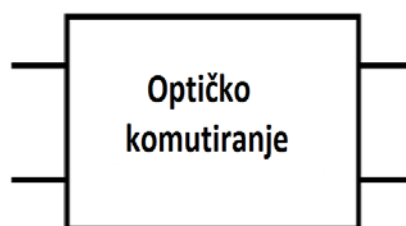
Slika 3.1.4. S komutator sa električnom konverzijom i električnim komutiranjem [4]

- S komutatori sa električnom konverzijom i optičkim komutiranjem kod kojih se, na ulazu u komutator, vrši dvostruka konverzija, najpre iz optičkog u električni domen (u električnom domenu se vrši zauzimanje resursa u optičkom domenu, tj. vrši se procesiranje kontrolnih informacija u električnom domenu radi konfigurisanja komutatora koji radi u optičkom domenu), potom opet u optički (ali u drugu talasnu dužinu, jer je to jeftinije rešenje), pa se vrši komutacija u optičkom domenu, za koju je napomenuto ranije u tezi, da je efikasnija od komutacije u električnom domenu jer podržava prenos velike količine podataka, slika 3.1.5.



Slika 3.1.5. S komutator sa električnom konverzijom i optičkim komutiranjem [4]

- Potpuno optički komutatori. Kod ovakvih komutatora moguće je vršiti komutaciju u optičkom domenu, pri čemu nema potrebe da se optički signal konvertuje u električni domen. To znači da je brzina komutiranja veća, nego kod prethodna dva tipa komutatora. Povećanje brzine implicira smanjenje mrežnih komponenti i potrošnje energije, zbog čega su ovi komutatori ekonomični.



Slika 8. Potpuno optički komutator [4]

Komutatori mogu biti [4]:

- Neblokirajući u strogom smislu (*strict-sense non-blocking*) - kod ovog komutatora se u svakom trenutku sa svakog ulaznog porta može komutirati signal na izlazni port, bez obzira na konekcije koje su već uspostavljene.
- Neblokirajući u širem smislu (*wide-sense non-blocking*) - kao i kod striktno neblokirajućeg komutatora, u svakom trenutku signal sa svakog ulaznog porta se može

komutirati na bilo koji izlazni port, ali pod uslovom korišćenja odgovarajućeg algoritma za nalaženje puta od ulaza do izlaza za uspostavu konekcije dotične veze koja se uspostavlja.

- Neblokirajući uz mogućnost rekonfiguracije (*rearrangeable*) - komutacija se vrši na isti način kao kod prethodna dva tipa, sa tom razlikom da se potencijalno neke postojeće konekcije moraju preusmeriti na alternativne puteve.
- Blokirajući - ovakav komutator nije u stanju da vrši komutaciju sa bilo kog ulaznog porta na bilo koji izlazni port u svim mogućim situacijama zbog već postojećih konekcija. Kod ovakvog komutatora nemoguće je primeniti metodu algoritma za nalaženje puta za uspostavu konekcije od ulaza do izlaza, kao ni metodu preusmeravanja postojećih konekcija na alternativne puteve.

Na osnovu tehnologija koje se primenjuju kod optičkih komutatora njihova podela se vrši na **brze (ns)** i **spore (ms)** optičke komutatore.

Tehnologije sporih komutatora [4]:

- MEMS
- Termo-optičke (*Thermo-Optic*)
- Mehur (*Bubble*)
- Tečni kristali (*Liquid-Crystal*)
- Hologramske (*Hologram*)
- Tečna rešetka (*Liquid Grating*)
- Zvučno-optičke (*Acusto-Optic*)
- Električno-mehaničke (*Electro-mechanical*)

Tehnologije brzih komutatora:

- SOA (InP)
- Električno-optičke (*Electro-optic*)
- Nelinearne (*Non-Linear*)
- PLZT

Tehnologije optičkih komutatora su od ključnog značaja za buduće potpuno optičke mreže. Mnoge različite tehnologije optičkih komutatora su trenutno dostupne ili su u fazi razvoja i još nije sigurno koja od tehnologija će postati dominantna. Svaka tehnologija optičkih komutatora ima jedinstvene karakteristike koje su specifične za primenu u optičkom domenu [7]. U nastavku teze će biti izložene najpoznatije tehnologije optičkih komutatora.

### 3.2. MEMS komutatori

Jedni od značajnijih optičkih komutatora, koji spadaju u grupu sporih komutatora, su MEMS komutatori. Svaki deo naziva za MEMS ima poseban smisao: mikro (strukture malih dimenzija koje se dobijaju mikrofabrikacijom), elektro (električni signal/kontrola), mehanički (mehanička funkcionalnost), sistemi (strukture, uređaji ili sistemi). To su, dakle, mikro-elektro-mehanički sistemi (*micro-electro-mechanical systems*) zasnovani na minijaturnim pokretnim ogledalima[8]. MEMS komutatori su uređaji koji koriste mehaničke pokrete ogledala, od kojih su sastavljeni, da bi vršili komutaciju. Oni su dizajnirani da rade na frekvenciji 0.1 GHz - 100 GHz. Snaga koja je potrebna da bi se pokreti realizovali se postiže korišćenjem elektrostatičkog, magnetostatičkog,

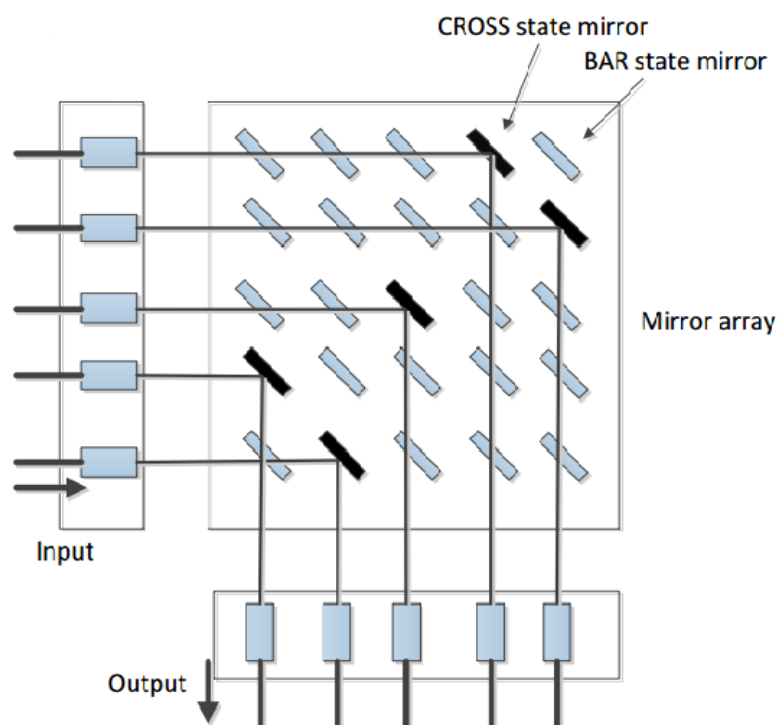
piezoelektričnog ili termalnog dizajna ovog komutatora. Do sada su se najbolje pokazali komutatori elektrostatičkog tipa. MEMS komutatori rade na talasnoj dužini od 1550 nm. Oni vrše komutaciju tako što se optički signali (svetlosni zraci) odbijaju o površinu tankih ogledala. Pošto se ogledala moraju pokretati da bi se dobila željena konfiguracija komutatora, brzina komutiranja je ograničena. Komutatori koji su nastali implementacijom ove tehnologije spadaju u grupu sporih komutatora. Proces komutacije traje nekoliko ms.

U odnosu na način na koji se vrši komutacija, komutatori mogu biti [4]:

- 1) 2D MEMS,
- 2) 3D MEMS.

Ova dva tipa komutatora se razlikuju na način na koji vrše usmeravanje svetlosti. U slučaju da postoji veliki broj ulaznih i izlaznih portova koristi se 3D MEMS komutator, jer zahteva manji broj ogledala nego 2D MEMS za isti broj ulaznih i izlaznih portova. Samim tim 3D MEMS komutatori su brži i unose manje gubitke (*insertion loss*) i imaju manje preslušavanje (*crosstalk*) u odnosu na 2D MEMS komutatore.

Što se tiče 2D MEMS komutatora, ogledala koja usmeravaju svetlost mogu se nalaziti samo u dva položaja (CROSS/BAR) kao što je prikazano na slici 3.2.1 [4].

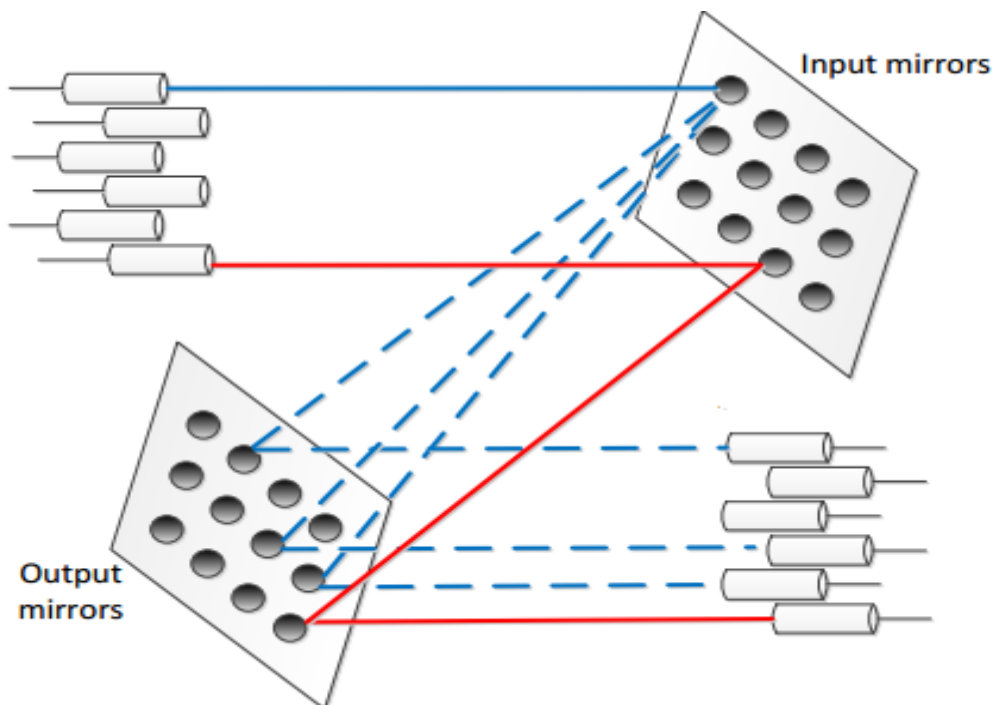


Slika 3.2.1. Ogledala koja usmeravaju svetlost kod 2D MEMS komutatora [4]

Kada su ogledala u BAR stanju, svetlost se propušta. U CROSS stanju svetlost se usmerava na neki od izlaza, tj. vrši se komutacija. Za  $N$  ulaza i  $N$  izlaza, potrebno je ukupno  $N^2$  ogledala kako bi se konstruisala neblokirajuća konfiguracija. Npr. za strukturu 16x16 potrebno je 256 ogledala. Postoji mogućnost da se više komutatora poveže u kaskadu, na taj način se proširuje dimenzija komutatora, ali se povećava kompleksnost i smanjuje brzina komutiranja zbog velikog broja ogledala u ovakvoj konfiguraciji.

3D MEMS komutatori su sastavljeni od ogledala koja se mogu rotirati oko dve ose, samim tim mogu zauzimati višestruke pozicije, zbog toga je moguće precizno usmerenje svetlosti pod

različitim uglom. Za veličinu komutatora  $N \times N$  potrebno je  $2N$  ogledala što je značajno manje u odnosu na potreban broj ogledala kod 2D MEMS komutatora. 3D MEMS komutatori su brži od 2D MEMS komutatora. Broj portova kod 3D MEMS komutatora može narasti do 1000, a da pri tom ne dođe do nekih velikih promena u prigušenju.



Slika 3.2.2. Rotirajuća ogledala kod 3D MEMS komutatora [4]

Da bi kontrolisali komutaciju, optičkim komutatorima su potrebne dodatne komponente [4]. Za takvu kontrolu se koriste kartice *soft patch cards*. Svaka kartica kontroliše skup ulaznih i izlaznih ogledala (ulazna i izlazna ogledala predstavljaju rezonatore ili šupljine kroz koje prolazi svetlost). Npr. za 3D MEMS optički komutator strukture  $96 \times 96$  potrebno je 12 *soft patch cards*.

Tipovi čvorova za konekciju, koji se mogu realizovati MEMS tehnologijom, su [4]:

- OXC (*Optical Cross Connect*)
- OADM (*Optical Add Drop Multiplexer*)
- ROADM (*Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer*).

Da bi se povećala brzina komutiranja potrebno je da se ogledala projektuju tako da ugao savijanja svetlosti bude što manji. Ova tehnika je poznata kao *fast MEMS* ili brzi MEMS. MEMS je spor komutator. Uzrok tome je prisutnost velikog broja pokretnih delova od kojih je komutator sačinjen. Gubici su 3 dB za  $4 \times 4$  komutatore, do 7 dB za  $16 \times 16$  komutatore. Ukoliko se više MEMS komutatora poveže da bi se postiglo proširivanje mreže, gubici će se povećati. Mogućnost ponovne upotrebe porta može biti problematična, zbog toga što svetlost putuje različitim talasnim dužinama između portova. Ponovna upotreba porta podrazumeva to da su svi putevi kroz komutator iste dužine. Ako nisu svi iste dužine, mogu da se jave problemi koji se manifestuju dodatnim gubicima. Obzirom na to da je MEMS sastavljen od više ogledala teško je proceniti energetske potrošnje. Cena ovih komutatora je veoma mala. 3D komutatori su pogodni za optičke kroskonektore sa velikim brojem portova, naročito ako se preusmeravaju grupe talasnih dužina zajedno iz jednog vlakna u drugo.

Glavni cilj u razvoju MEMS tehnologije je da se minimizuje broj elemenata koji ulaze u sastav uređaja [6]. Na taj način bi se smanjili troškovi, jer bi potrošnja materijala bila manja. Primeri primene MEMS tehnologije su senzori koji su ugrađeni u različitim uređajima, zatim kamerama, fotoaparatom i najnovijim mobilnim telefonima (*smartphone*). Kao što vidimo, MEMS tehnologija se ne koristi samo u optičkim telekomunikacijama.

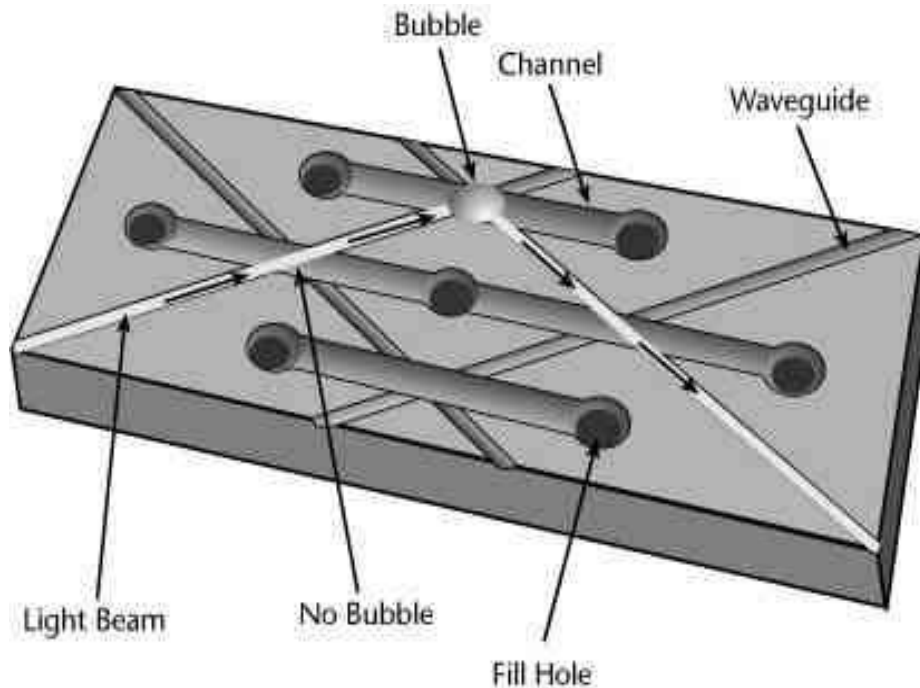


Slika 3.2.3. Proizvodi široke potrošnje u kojima se koriste MEMS uređaji: *iPhone*, *iPad* i *iPod* [9]

MEMS tehnologije omogućavaju ugradnju smanjenih “inteligentnih” komponenti [12]. Široka primena je moguća zbog niskih troškova proizvodnje. Nove primene MEMS tehnologije se očekuju već u narednim godinama, što govori da je budućnost ove tehnologije obećavajuća.

### 3.3. Mehur (*Bubbles*) komutatori

Optički komutator zasnovan na *Bubbles* tehnologiji sastoji se od paralelnih ulaznih i paralelnih izlaznih vodova koji se formiraju na podlozi tako da se međusobno seku pod uglom od 120 stepeni [13]. Na raskrsnici ulaznih i izlaznih vodova se nalazi šupljina u kojoj se formira mehur. Mehur se formira u gornjem sloju podloge uz pomoć male elektrode. Elektroda zagreva tečnost kako bi formirala gas. Podloga na kojoj se nalaze ulazni i izlazni vodovi se sastoji iz dva sloja. Donji sloj je od stakla, a gornji sloj je od silicijuma. Paralelni ulazni i izlazni vodovi su ispunjeni tečnošću, koja ima isti indeks prelamanja kao i staklo, kojom putuje svetlost. Svetlost prolazi kroz kanale sve dok se ne odbije o mehur, koji se nađe na tom putu. Po odbijanju o mehur svetlost nastavlja kroz kanal koji joj je prelazio put.

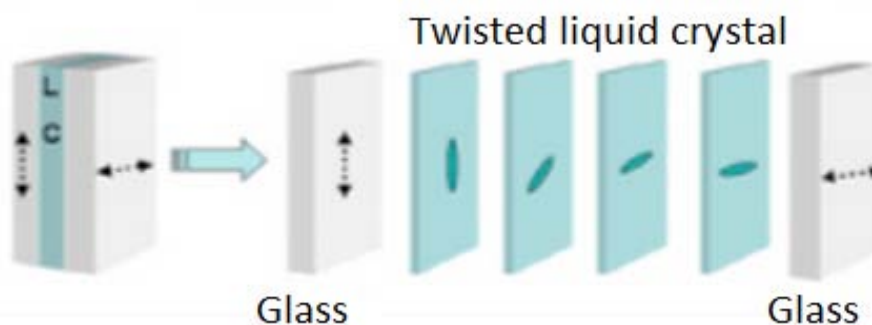


Slika 3.3.1. Mehur (*Bubbles*) optički komutator [14]

Moguće je više komutatora međusobno povezivati. Glavni problem su gubici. Što se brzine komutiranja tiče, ovi komutatori su u rangu sa MEMS komutatorima. Brzina komutiranja iznosi oko 10 ms. Ali za razliku od MEMS komutatora Bubbles komutatori nemaju pokretnih delova, što znači da je pouzdanost dobra, odnosno ovi komutatori imaju duži vek trajanja. Njihova cena je mala. Energetska potrošnja je nepoznata. Gubici su 4-5 dB za sistem 32x32 [8]. Primenjuju se u konfiguraciji *add-drop* multipleksera. Ovo su skalabilni komutatori.

### 3.4. Tečni kristali (*Liquid Crystal*)

Optički komutatori zasnovani na tehnologiji tečnih kristala zavise od polarizacionih osobina svetlosti koja se komutira [15]. Komutacija se vrši u nekoliko faza. Prva faza podrazumeva filtriranje svetlosti na ulazu u optički komutator i odabir njene polarizacije. U drugoj fazi svetlost ulazi u tečni kristal koji menja njenu polarizaciju kao što je prikazano na slici 3.4.1. Nakon toga svetlost nailazi na pasivni optički uređaj, u ovom slučaju ogledalo, koji usmerava svetlost na različite načine u zavisnosti od njene polarizacije.



Slika 3.4.1. Struktura tečnih kristala (*Liquid crystal*) primenjenih kod optičkih komutatora [16]

U teoriji skalabilnost ovih uređaja je na zadovoljavajućem nivou. Ali u praksi, proizvođači pribegavaju razvoju uređaja mnogo skromnijih dimenzija. Kako bi se povećala brzina komutiranja proizvođači koriste različite metode. Jedna od njih je zagrevanje tečnih kristala, jer se na taj način smanjuje njihova viskoznost. Pouzdanost je dobra jer nema delova koji se pomeraju. Glavni problem kod ovakvih komutatora predstavljaju gubici. Svetlost koja se komutira, pre ulaska u tečni kristal, se mora podeliti u dva različito polarizovana signala, posle toga sledi proces rekombinacije. I ako se dužine puta ova dva signala razlikuju (što je češći slučaj) dolazi do gubitaka. Cena ovih komutatora nije poznata [8]. Za bistabilne kristale (one kojima je potrebna struja da bi se prebacili iz jednog stanja u drugo) energetska potrošnja je mala. Kristali koji imaju jedno stabilno stanje potrebno je da stalno budu pod naponom, pa je energetska potrošnja veća u odnosu na bistabilne kristale. kao što je već pomenuto, da bi se povećala brzina komutiranja vrši se zagrevanje kristala, to zagrevanje povećava potrošnju, te ova tehnologija i nije baš dominantna, ali je povoljna za uređaje skromnih dimenzija i koji su osetljivi na talasne dužine.

### 3.5. Hologramski komutatori (*Hologram*)

Centralni deo hologram optičkog komutatora sastavljen je od feroelektričnog tečnog kristala, a ulazni i izlazni portovi su predstavljeni u vidu linearnog niza. Princip hologramskih komutatora se zasniva na dinamičkom stvaranju rešetke koja je reflektivna za određenu talasnu dužinu. Kod *Hologram* optičkog komutatora unutar feroelektričnog tečnog kristala smeštena je *Bragg-ova* rešetka (*Bragg-ova* rešetka predstavlja 3D difrakcionu rešetku sa nizom pukotina, na kojima se upadni talas razlaže na nekoliko delova) u obliku holograma [17]. Kada je *Bragg-ova* rešetka pod naponom svetlost se refraktuje ka nekom od izlaznih portova. Kada rešetka nije pod naponom svetlost prolazi kroz celu strukturu. Oblik holograma je nevidljiv sve dok se ne uključi skup elektroda. Pri procesu komutacije javljaju se preslušavanja i gubici na reflektovanoj talasnoj dužini. *Hologram* tehnologija je pogodna za optičke komutatore sa nekoliko hiljada portova. Hologram optički komutatori su veoma brzi. Brzina komutiranja iznosi svega nekoliko ns. Nemaju pokretne delove, pouzdanost je dobra. Mogućnost ponovne upotrebe je dobra, ne postoji nikakva zavisnost od puta. Cena nepoznata. Zahtevaju skupu opremu za električno napajanje, energetska potrošnja je veoma velika, što je jedna od glavnih mana. Ovakav komutator je dizajniran da radi na talasnoj dužini od 1.55  $\mu$ s, a gubici je kreću u opsegu od 16.9 dB– 19.1 dB [17].



Slika 3.5.1. Primena Hologram tehnologije. Optički mikroskop [19]

Brzina komutiranja, koja je na veoma zadovoljavajućem nivou, pruža mogućnost komutiranja paket po paket u optičkim ruterima. Ovo je jedna od tehnologija sa ovom mogućnošću.

U odnosu na 3D MEMS komutatore, *Hologram* optički komutatori su skalabilniji, bolji su za komutiranje pojedinačnih talasnih dužina od komutiranja grupe talasnih dužina [8].

### 3.6. Tečne rešetke (*Liquid Grating*)

Optički komutatori, nastali implementacijom ove tehnologije, se u pogledu principa rada nalaze između *Hologram* optičkih komutatora i tečnih kristala. Njihov rad je zasnovan na *Bragg*-ovoj rešetki. i na tržištu se označavaju kao električno komutacione *Bragg-ove* rešetke (*Electricially Switchable Bragg Gratings*, *ESBGs* ili *S-Bugs*) [8]. Promenom električnog napona *Bragg-ova* rešetka se pojavi ili nestane, a to kontrolišu mikrokapljice tečnog kristala koji se nalaze u sloju polimera. Ove mikrokapljice se smeštaju na vrhu talasovoda. Kao i kod *Hologram* optičkog komutatora, kada *Bragg-ova* rešetka nije pod naponom ona odbija određenu svetlost na vrhu talasovoda. U drugom slučaju kada je rešetka pod naponom svetlost direktno prolazi kroz strukturu.

Velika prednost ovih komutatora je ta što obavljaju dve funkcije, vrše izdvajanje talasne dužine i komutiranje iste talasne dužine. Brzina komutiranja je visoka. Jedino su *Hologram* optički komutatori brži od komutatora koji se zasnivaju na tehnologiji tečne rešetke. Nisu povoljni za primenu u uređajima sa velikim brojem portova. Gubici su mali, oko 1 dB. Nema delova koji se pomeraju što znači da imaju duži vek trajanja i veću pouzdanost. Ne mogu se porediti sa MEMS komutatorima iz tog razloga što oni nisu u stanju da komutiraju grupu talasnih dužina, već komutiraju jednu po jednu talasnu dužinu.

### 3.7. Akusto-optički komutatori (*Acusto-optic commutators*)

Kroz napore mnogih istraživačkih grupa tokom poslednjih nekoliko godina, akusto-optički komutator je evoluirao u uređaj visokih performansi i zauzeo važnu ulogu rutiranja u WDM sistemima [21]. Kod ove tehnologije audio-komponenta tj. zvuk se koristi za kontrolisanje optičkog puta. Promena osobina zvuka menja osobine kristala koji vrši komutaciju. U ovim uređajima koriste se zvučni talasi kako bi se reflektovala svetlost. Postoje dve tehnike realizacije akusto-optičkih komutatora. Prva je tehnika spojenih kaplera, a druga je tehnika kristala koji imaju osobinu promene indeksa prelamanja svetlosti u zavisnosti od zvučnog signala. Kod tehnike spojenih kaplera optički komutator se sastoji od dva parčeta spojenih vlakna na jednom mestu. Spajanje se vrši na taj način da se svetlost određene talasne dužine stiče iz jednog vlakna u drugo, dok druge talasne dužine nastavljaju svoj put duž originalnog vlakna.



**Slika 3.7.1. Proizvod na kome se primenjuje akusto-optička tehnologija. Audio-optički kabl [22]**

Skalabilnost akusto-optičkih komutatora baziranih na tehnici kristala koji imaju osobinu promene indeksa prelamanja svetlosti je veća u odnosu na komutatore koji se zasnivaju na spojenim



kaplerima. Ova tehnologija je značajna zbog toga što, prilikom komutiranja, zvučna komponenta pojačava signal koji se komutira, i time nadoknađuje gubitke. Brzina komutiranja se kreće u opsegu od 500 ns – 10 ms [8]. Pouzdanost je dobra jer nema delova koji se pomeraju. Mana ove tehnologije je ta što je ona prilično skupa. Energetska potrošnja je nepoznata. Ovi komutatori su osetljivi na talasne dužine.

### 3.8. Optički komutatori sa poluprovodničkim pojačavačima (SOA)

SOA (*Semiconductor optical amplifier*) optički pojačavač ima višestruku primenu u optičkim mrežama. Pored toga što se koristi kao pojačavački element, može se koristiti i kao konvertor talasnih dužina, ali i za konfigurisanje optičkih komutatora [23]. Ako bi se u budućnosti realizovale potpuno optičke mreže, one bi zahtevale optičke komutatore velikih brzina, a komutatori na bazi SOA pojačavača se idealno uklapaju u taj zahtev.

Jednostavan optički komutator na bazi poluprovodničkog pojačavača se može realizovati tako što se signal, koji se komutira, podeli u dva odvojena talasovoda, od kojih svaki vodi do jednog SOA pojačavača. Puštajući struju jednom SOA pojačavaču, a ne drugom, signal može da se natera da napreduje ka samo jednom od izlaza. Velika prednost ovih komutatora je to što su brzi, brzina komutiranja iznosi nekoliko ns, a još dodatna pogodnost je ta što tokom komutiranja pojačavaju signal, čime se nadoknađuju gubici. Mogu se povezati tako da čine nizove komutatora. Moguće je povezati nekoliko komutatora tako da se formira veliki kroskonektor [8]. Mane su relativno visok nivo šuma, visoka cena, uskopojasno pojačanje i osetljivost na elektrostatičke šokove.

### 3.9. Optički kontrolisani optički komutatori

Proces komutacije kod ovakvih komutatora započinje tako što na ulaz u optički komutator dolaze dva signala, signal i kontrola, i to posredstvom kvantnog Starkovog efekta (to je pojava cepanja spektralne linije u električnom polju) u *pin* diodi [8]. Komutator vrši modulaciju izlaznog signala kontrolnim signalom. Za komutaciju je potrebna mala snaga reda milivata. Ovi komutatori mogu raditi sa velikim brzinama protoka, čak i do 40 Gb/s. Uključuju se i isključuju električno. Komutacija se vrši unutar samog uređaja, tako da nema potrebe za linijama prenosa, što dodatno smanjuje troškove. Ovo su brzi komutatori, brzina komutiranja iznosi 20 ps.

Postoje dve verzije uređaja: optički kontrolisani komutator sa jednom *pin* diodom (pin dioda predstavlja p-n spoj/čvor koji je dizajniran sa veoma malom kapacitivnošću, oko 0.01 pF) i optički kontrolisani komutator sa dve *pin* diode [23].

### 3.10. Termo-optički komutatori (*Thermo-Optic commutators*)

Termo-optički komutatori pri komutaciji koriste fazne osobine svetlosti [24]. Ulazni signal se deli i dalje se šalje na dva odvojena talasovoda. Kada se ova dva signala (svetlosna snopa) susretnu u kapleru, koji se nalazi na drugoj strani komutatora, dolazi do interferencije. Da bi se menjao indeks prelamanja svetlosti, a i dužina puta, koristi se električna ili termička pobuda. Ako je dužina puta ova dva svetlosna snopa jednaka, svetlost se komutira u pravcu jednog izlaza, ako nisu jednaka svetlost se komutira u pravcu drugog izlaza. Postoje dva tipa termo-optičkih komutatora: digitalno optički komutatori i interferencijski komutatori. Digitalno optički komutatori imaju osobinu da ostaju u istom stanju ako se poveća snaga grejača, bez obzira da li je uključen ili isključen. Interferencijski komutatori su kompaktniji, ali mana im je što su osetljivi na talasne dužine.



**Slika 3.10.1. Praktična primena termo-optičke tehnologije. Adresabilni optički detektor dima [26]**

Veličina kod termo-optičkih komutatora nije ograničena optičkim gubicima, već energijom koja se troši u komutatoru na zagrevanje [8]. Ograničeni su na jednostavan dvoportni uređaj u samostalnom stepenu, međutim korišćenjem višestepene konfiguracije moguće je napraviti veće komutatore. Termo-optički komutatori su među najbržim optičkim tehnikama optičkih komutatora. Pouzdanost je potencijalno dobra s obzirom da nema delova koji se pomeraju. Ali stalno grejanje i hlađenje mogu da ograniče vek komutatora. Mogućnost ponovne upotrebe porta je dobra. Cena je niska, pošto već postoji masovna proizvodnja uređaja zasnovanih na ovoj tehnologiji. Potrošnja energije je mala, oko 5 mW.

### **3.11. Primena tehnologija optičkih komutatora**

Tehnologije optičkih komutatora se primenjuju u [9]:

- Telekomunikacijama (u radio i telekomunikacionoj terminalnoj opremi, radio sistemima navigacionih uređaja, pametnim telefonima, mrežnim čvorovima optičkih telekomunikacionih mreža).
- Automobilskoj industriji (u sistemima vazdušnih jastuka, bezbednosnim sistemima u vozilima, svetlima za kočnice, uređajima za pozicioniranje prednjih farova, automatsko zaključavanje).
- Proizvodima široke potrošnje (u aparatima i spravama za sportske treninge, perifernim uređajima za kompjutere, navigacionim uređajima za automobile i ličnu upotrebu, u mobilnim aplikacijama).
- Industriji (u uređajima za detektovanje zemljotresa, za regulaciju/isključivanje gasa, za testiranje ispravnosti aparata i mašina, registrovanje udara i potresa).
- Vojnoj industriji (u uređajima u tenkovima, avionima i opremi za vojnike).
- Medicini (biočipovi za detektovanje opasnih hemijskih i bioloških supstanci, za DNK identifikaciju).
- Vazduhoplovstvu i istraživanju svemira (to su merači ubrzanja i žiroskopi za unutrašnju navigaciju, senzori za pritisak, radiofrekventni prekidači i filteri za komunikaciju, uređaji za kontrolu pokreta i položaj).

Kompanije koje se bave primenom tehnologija optičkih komutatora su: Robert Bosch (Nemačka), ST MICRO (Italija/Francuska), Lexmark (SAD), SEIKO-EPSON (Japan), Bei technologies (SAD, Kalifornija) i Analog Devices (SAD, Boston) i mnoge druge. Kao što vidimo

budućnost tehnologija optičkih komutatora je veoma svetla usled primenljivosti ovih tehnologija na širok spektar oblasti koji uveliko nadilazi samu oblast optičkih telekomunikacija. Međutim, kao što ćemo videti u narednom poglavlju i dalje postoje veliki problemi koji sprečavaju lak prelazak telekomunikacionih mreža iz električnog u potpuno optički domen.

## 4. PROBLEMI KOJI SE JAVLJAJU KOD OPTIČKIH KOMUTATORA

Naglim porastom Internet korisnika i težnjom operatera da se ispune zahtevi korisnika izazvali su potrebu za što većim brzinama i propusnim opsegom, pri prenosu podataka, koja svakodnevno raste. Smatra se da je WDM tehnologija jedno od efikasnijih rešenja koje bi rešilo problem potrebe za većim brzinama prenosa usled sve veće količine korisničkog saobraćaja koju je potrebno prenositi. WDM sistemi se zasnivaju na multipleksiranju signala po talasnim dužinama, čime se postiže prenos više signala istim optičkim kablom, ali na različitim talasnim dužinama. Međutim, sa nedavno ostvarenim kapacitetom od 10 Tb/s po svetlovodu, ruteri se ne mogu nositi. Atraktivno rešenje za ovaj problem predstavlja optička komutacija, pod kojom se podrazumeva direktna komutacija svetlovod – svetlovod, i pri kojoj nije potrebno vršiti konverziju signala iz optičkog u električni domen.

Optička komutacija predstavlja veliki izazov, ali postoje tri velika problema koja je potrebno rešiti:

- **Problem baferisanja sadržaja paketa u optičkom domenu[5].** Tehnike koje su trenutno dostupne u praksi za formiranje bafera su kreiranje optičke linije za kašnjenje (optičko vlakno) i linije za kreiranje optičke petlje (koja je isto optičko vlakno). Obe tehnike se zasnivaju na tome da se u njih pusti jedan ili više paketa da prođu kroz vlakno u vidu linije ili petlje i dok se paketi nalaze u njima oni su baferisani. Na izlazu iz linije za kašnjenje paket se mora ili proslediti ili ponovo vratiti u liniju za kašnjenje ako se želi i dalje baferisati. U slučaju petlje, paketi kruže po petlji dok ne dođe vreme za njihovo dalje prosleđivanje. Struktura bafera je, očigledno, manje funkcionalna nego u električnom domenu. Dužina linije/petlje određuje kapacitet bafera.
- **Problem efikasne implementacije logičkih funkcija u optičkom domenu.** Paketi zahtevaju intenzivno procesiranje, na primer, lukap funkcija za određivanje izlaznog porta na koji paket treba da izađe ili proveru ispravnosti paketa. Zbog toga je bitno imati tehnološku mogućnost implementacije složenih logičkih i aritmetičkih funkcija koje omogućavaju efikasno procesiranje paketa. Optički domen još uvek nema tako napredne mogućnosti obrade.
- **Problem segmentacija paketa promenljive dužine.** Paketi promenljive dužine se koriste na Internetu, tj. u okviru IP tehnologije. Komutatori znatno efikasnije rade ako komutiraju pakete fiksne dužine. U električnom domenu nije problem izvršiti segmentaciju paketa, dok u optičkom domenu to nije jednostavno.

U pogledu prosleđivanja paketa u optičkom domenu postoje tri moguća pristupa:

- 3) **Komutacija kola** [5]. Svrha komutacije kola je da se kroz mrežu nađe fizički put kroz koji će korisnici ostvariti međusobnu komunikaciju. Kada se put pronade i uspostavi, onda se on koristi samo za komunikaciju između ta dva korisnika dok se veza ne raskine. Bitna osobina je da zauzeti resursi za jednu vezu se koriste samo za opsluživanje dotične veze dok ona traje i tek nakon raskidanja veze se oslobađaju zauzeti resursi koje potom

može koristiti neka druga veza. Ovo svojstvo omogućava davanje garancija kvaliteta servisa korisnicima, ali i slabo iskorišćenje resursa mreže bazirane na komutaciji kola. Komutacija kola u optičkom domenu se zasniva na sledećem principu. U električnom domenu se izvrši zauzimanje resursa u optičkoj mreži (optičkom domenu) koja se zasniva na konfigurisanju mrežnih čvorova. Konverzija se uglavnom radi tako što se signal konvertuje u električni domen i potom opet prevede u optički domen, ali u drugu talasnu dužinu. Moguća je konverzija talasne dužine direktno u optičkom domenu, ali to je skuplje rešenje. Uspostava veze se vrši u oba smera. Pošto se uspostavi veza (zauzmu resursi) razmenjuju se paketi u optičkom domenu, a pošto se koristi komutacija kola, nema potrebe za baferisanjem ni za procesiranjem paketa u optičkom domenu čime se izbegavaju problemi optičkih tehnologija navedeni ranije u okviru ovog poglavlja.

- 4) **Komutacija paketa.** U mreži sa komutacijom paketa tokom komunikacione sesije između izvora i odredišta, podaci se dele u pakete, koji se usmeravaju kroz mrežu (najčešće na osnovu adrese odredišta). Tako da se uspostavlja logička veza između izvora i odredišta, koja se može realizovati po različitim fizičkim vezama. Komutacija paketa u optičkom domenu se zasniva na tome da se obrađuje paket po paket. Ako se uzmu u obzir trenutni problemi u postizanju cilja da mrežni čvorovi postanu potpuno optički, očigledno je da je trenutno tehnološki nemoguće i neisplativo kreirati potpuno optički mrežni čvor za paketske mreže. Na ulaznom portu se vrši konverzija paketa iz optičkog u električni domen, pa se vrši komutacija u električnom domenu, na izlazu se ponovo vrši konverzija, ali iz električnog u optički domen. Drugo rešenje je da se samo zaglavlja paketa konvertuju u električni domen i procesiraju, a da se paket komutira u potpunosti u optičkom domenu bez konverzije u optički domen. U tom slučaju se koriste optička rešenja za baferisanje paketa, a za konfigurisanje optičkih komutatora se i dalje koristi električni domen jer je trenutno bolji zbog efikasnije implementacije kontrolne logike.
- 5) **Komutacija burstova.** Predstavlja kompromis između komutacije kola i paketa. Na ivici optičkog domena, mrežni čvor sakuplja burstove paketa prema drugim mrežnim čvorovima na ivici optičkog domena. Kada se nakupi dovoljno veliki burst, vrši zauzimanje puta kroz optički domen i potom šalje burst po zauzetom putu čime se izbegava procesiranje i baferisanje paketa iz bursta u okviru mrežnih čvorova koji se nalaze na zauzetom putu. Put se zauzima samo u jednom smeru. Ovaj princip unosi dodatno kašnjenje usled procesa formiranja burstova, ali i zauzimanja puta, i neophodno je razviti efikasne algoritme koji će proceniti kada burst treba da se pošalje.

Tehnologije optičkih komutatora koje su opisane u prethodnom poglavlju se susreću sa gore navedenim problemima pri čemu zavisi od same tehnologije koji je problem dominantnije izražen. Optička komutacija paketa je veoma zahtevna naročito u pogledu brzine komutiranja i broja portova. Na primer, interesantno je da su MEMS komutatori neprevaziđeni po broju portova (dobra skalabilnost), ali su veoma slabi što se tiče performansi sa stanovišta brzine komutacije. MEMS komutatori su spori i ne mogu se primenjevati u komutaciji na nivou paketa. Hologram optički komutatori su brzi, i kod njih se komutiranje vrši paket po paket, te ova tehnologija ima potencijalnu primenu u optičkoj komutaciji na nivou paketa, a dodatno je pogodna za komutatore sa nekoliko hiljada portova, što čini ovu tehnologiju veoma perspektivnom sa stanovišta optičke komutacije na nivou paketa, ali su za sada i dalje prisutni gore navedeni problemi poput procesiranja paketa u optičkom domenu da bi ova tehnologija bila u potpunosti ekvivalentna trenutnim rešenjima u električnom domenu. Optički Bubble komutatori su spori. Termo-optički komutatori su brzi, ali su ograničeni na dvoportni uređaj tj. imaju slabu skalabilnost. I ostale tehnologije navedene u prethodnom poglavlju imaju određene mane. Dakle, trenutno nijedna

tehnologija ne nudi kompletno rešenje problema, navedenih u ovom poglavlju, koji se javljaju u optičkim mrežama. Međutim, pozitivna činjenica je mogućnost upotrebe tehnologija optičkih komutatora i u drugim oblastima pored optičkih telekomunikacionih mreža, čime je zagarantovano da će se industrija i dalje intezivno baviti razvojem tehnologija optičkih komutatora.

## 5. ZAKLJUČAK

Zahtev za naglim povećanjem propusnog opsega, moguće je rešiti primenom potpuno optičkih mreža. Koristan signal, koji se prenosi optičkim putem, bi se u takvim mrežama obrađivao na optičkom nivou. Tehnološki razvoj optičkih elemenata, uređaja i sistema pokušava da ponudi rešenje. Međutim, postoje dva otvorena problema koja treba rešiti da bi se potpuno optičke mreže realizovale. Prvi je procesiranje optičkih signala pri ekstremno velikim brzinama u optičkom domenu, a drugi baferisanje optičkih paketa da bi se moglo ostvariti statističko multipleksiranje neophodno za realizaciju tehnologije komutacije paketa.

U radu je dat opis aktuelnih tehnologija optičkih komutatora: MEMS, mehur, tečni kristali, hologram, tečne rešetke, akusto-optičke, optički komutatori sa poluprovodničkim pojačavačima, optički kontrolisani komutatori i termo-optički komutatori. Takođe je istaknuto da ove tehnologije nemaju samo praktičnu primenu u telekomunikacijama, već i u mnogim drugim oblastima.

Optički komutatori još nisu u potpunosti istraženi. Na osnovu funkcija optičkih komutatora, ključnih karakteristika, koje uključuju skalabilnost, brzine komutiranja, pouzdanost, cenu, energetska potrošnja može se zaključiti da trenutno ne postoji nijedna tehnologija koja bi mogla da zadovolji sve navedene zahteve. Trenutno se preporučuje veliki broj različitih tehnologija za postizanje potpuno optičkih komutatora. Neke tehnologije su uspešnije od drugih, ali izgleda da nijedna od njih neće postići potpunu dominaciju, jer postoje još mnogi problemi koji se trebaju rešiti da bi optički komutatori potpuno zaživeli u praksi.

Optički komutatori su veoma izazovna tema i iziskuju mnogo istraživačkih napora. I dan danas se vrši istraživanje tehnologija optičkih komutatora radi utvrđivanja koja od njih ima najbolje performanse i koja bi se najbolje uklapala za realizaciju potpuno optičke mreže. Tehnologija MEMS optičkih komutatora može biti jedan od najboljih pristupa trenutno. Ali nije isključeno da će se u budućnosti pojaviti neka nova tehnologija čijom će se primenom obezbediti stvaranje potpuno optičke mreže.

## LITERATURA

- [1] Dejan Gvozdić, "Uvod u optičke telekomunikacije", 2015
- [2] <http://www.nature.com/>
- [3] Karbowski, "Losses in fiber", *Laser Focus*
- [4] [https://www.fer.unizg.hr/download/repository/P9\\_FTM\\_2014\\_Opticke\\_komutacijske\\_tehnologije.pdf](https://www.fer.unizg.hr/download/repository/P9_FTM_2014_Opticke_komutacijske_tehnologije.pdf)
- [5] Zoran Čiča, "Komutacioni sistemi", 2013
- [6] [https://www.google.rs/search?q=opticki+komutator&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=iMdtVbygF6agyAPfvoD4DQ&ved=0CAYQ\\_AUoAQ&dpr=1](https://www.google.rs/search?q=opticki+komutator&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=iMdtVbygF6agyAPfvoD4DQ&ved=0CAYQ_AUoAQ&dpr=1)
- [7] Xiaohua Ma, "Optical Switching technology comparasion, optical MEMS vs. other technologies", *IEEE Communication Magazine*, 2003.
- [8] <http://infotech.etf.unssa.rs.ba/zbornik/2003/radovi/bi/b-i-8.doc>
- [9] Tatjana A. Djakov, Ivanka G. Popović, Ljubinka V. Rajaković, "Mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS) – Tehnologija za 21. vek", 629-634
- [10] Martin Nyman, Jean-Michel Karam, "MEMS Bring Reliable Track Record to Telecom Applications"
- [11] Milošević Duško, Čelić Milan "Application of MEMS technology in telecommunication", 2006
- [12] E. Ollier, "Optical MEMS Devices Based on Moving Waveguides", *IEEE Communication Magazine*, 155 -162, 2002
- [13] <https://www.google.com/patents/US4988157>
- [14] <https://www.google.com/search?tbm=isch&q=bubbles+optical+switches&hl=en&authuser=0>
- [15] W. A. Crossland, I. G. Manolis, M. M. Redmond, K. L. Tan, T. D. Wilkinson, M. J. Holmes, T. R. Parker, H. H. Chu, J. Croucher, V. A. Handerek, S. T. Warr, B. Robertson, I. G. Bonas, R. Franklin, C. Stace, H. J. White, R. A. Woolley, and G. Henshall, "Holographic Optical Switching", *Journal of Lightwave Technology*
- [16] <https://www.google.com/search?tbm=isch&q=liquid+crystal+optic+switch&hl=en&authuser=0>
- [17] B. Kojić-Prodić i K. Molčanov, "Stogodišnjica rendgenske kristalografije," (7-8) 247–260 (2013)
- [18] W. A. Crossland, I. G. Manolis, M. M. Redmond, K. L. Tan, T.D. Wilkinson, A. Chu, M. J. Holmes, T. Parker, I. G. Bonas, B. Robertson, S. T. Warr, C. Stace, H. J. White, R. A. Woolley and G. Henshall, "Beam steering optical switches using LCOS: The ROSES



demonstrator", *IEEE Electronics and Communications Meeting, Microdisplay and Smart Pixel Technologies*, 2004

- [19] <https://www.google.rs/search?q=hologram+opticki+svicevi&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=DeJtVdLyOoTVygPorIHgBw&ved>
- [20] G. W. Gray and P. A. Winsor, "Liquid Crystals and Plastic Crystals", 1974
- [21] A. Kar-Roy and C. S. Tsai, "Integrated acousto-optic tunable filters using weighted coupling", *IEEE Communication Magazine*, 1574-86, 1994
- [22] [https://www.google.rs/search?hl=en&site=img&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=667&q=opticki+svicevi&oq=opticki+svicevi&gs\\_l=img.12...15424.20600.0.23439.15.7.0.8.8.0.28.117.7.7.0....0...1ac.1.64.img..6.9.131.QPbF2nGh\\_XI](https://www.google.rs/search?hl=en&site=img&tbm=isch&source=hp&biw=1366&bih=667&q=opticki+svicevi&oq=opticki+svicevi&gs_l=img.12...15424.20600.0.23439.15.7.0.8.8.0.28.117.7.7.0....0...1ac.1.64.img..6.9.131.QPbF2nGh_XI)
- [23] Michael Connelly, "Semiconductor Optical Amplifiers and their Applications", [http://www.researchgate.net/publication/229035390\\_Semiconductor\\_Optical\\_Amplifiers\\_and\\_their\\_Applications](http://www.researchgate.net/publication/229035390_Semiconductor_Optical_Amplifiers_and_their_Applications)
- [24] Martinell, R. & Rosen, The pin diode circuit designers handbook, [http://www.ieee.li/pdf/pin\\_diode\\_handbook.pdf](http://www.ieee.li/pdf/pin_diode_handbook.pdf)
- [25] Peng Sun and Ronald M. Reano, "Submilliwatt thermo-optic switches using free-standing silicon-on-insulator strip waveguides", *OSA publishing*, 2010
- [26] [https://www.google.rs/search?q=adresabilni+opti%C4%8Dki+detektor+dima&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=HRFuVdjHBcm5sQG2q4HwAg&ved=0CAYQ\\_AUoAQ](https://www.google.rs/search?q=adresabilni+opti%C4%8Dki+detektor+dima&biw=1366&bih=667&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=HRFuVdjHBcm5sQG2q4HwAg&ved=0CAYQ_AUoAQ)