



SELINUS UNIVERSITY
OF SCIENCES AND LITERATURE

**Trasmissioni ottiche:
dalla fibra ottica al “Light Fidelity”**

By
Cristiano Alivernini

A DISSERTATION

Presented to the Department of Engineering & Technology
program at Selinus University

**Faculty of Engineering & Technology
in fulfillment of the requirements
for the accelerated degree of Bachelor of Sciences
in Telecommunication Engineering**

GIUGNO 2019

INDICE

ABSTRAT	pag. 3
1 - SISTEMI TRASMISSIVI	pag. 4
1.1 Caratteristiche dei sistemi trasmissivi	pag. 4
1.2 Il mezzo ottico	pag. 5
1.3 Funzionamento trasmissioni ottiche	pag. 8
2 – PROPAGAZIONE DEL SEGNALE OTTICO	pag. 12
2.1 Emittore	pag. 12
2.2 Il laser	pag. 13
2.3 Amplificatore	pag. 16
2.3.1 Amplificatori in fibra drogata	pag. 18
2.3.2 Amplificatori a semiconduttore	pag. 20
2.3.3 Amplificatori Raman	pag. 21
2.4 Ricevitore ottico	pag. 22
2.5 Il rumore del ricevitore	pag. 25
3 – TRASMISSIONI OTTICHE	pag. 27
3.1 I sistemi DWDM	pag. 31
3.2 Sistemi in fibra PDH E SDH	pag. 35
3.2.1 PDH e SDH	pag. 36
3.2.2 Gigabit Ethernet	pag. 38
4 – LIFI	pag. 42
4.1 Visual Light Communication	pag. 42

ABSTRACT

Questa tesi vuole spiegare l'evoluzione delle comunicazioni che sfruttino le leggi dell'ottica e la trasmissione ottica guidata (fibra) e in campo aperto.

L'analisi inizia con un breve excursus temporale sulle intuizioni che sono alla base delle trasmissioni ottiche, sulle innovazioni dagli anni '60 in poi che hanno dato nuova linfa agli studi sul trasferimento ottico dei segnali grazie all'invenzione delle prime sorgenti laser e quindi grazie a trasmettitori più raffinati ed efficienti. Prosegue trattando il tema del mezzo trasmissivo guidato, la fibra, delle leggi fisiche che ne regolano il funzionamento e dell'evoluzione tecnologia che ha subito e che subisce tutt'ora in relazione ai vari utilizzi progettuali. La fibra viene trattata dal punto di vista fisico, teorico e strutturale, presentando anche i possibili sviluppi futuri. All'analisi del mezzo ottico (fibra) segue l'analisi fisica dell'amplificatore ottico e le varie nature (ad Erblio, a semiconduttore), e l'analisi del ricevitore ottico con il rumore termico che ne deriva. Vengono trattati i temi della dispersione e della attenuazione di segnale, gli effetti ottici non lineari e le "soluzioni" a queste problematiche. Si arriva a trattare i sistemi trasmissivi ottici WDM (Wavelength division multiplexing) e i sistemi DWDM (Dense Wavelength division multiplexing). Nell'ultima parte vengono trattate la ricezione Ottica in spazio libero (canale atmosferico) e la tecnologia FSO (Free Space Optics), e applicazioni ibride con Fibra-FSO, le varie applicazioni che ne stanno facendo alcuni brand, le potenzialità tecnologiche e i limiti.

1. SISTEMI TRASMISSIVI

1.1 Caratteristiche dei sistemi trasmissivi

Il sistema trasmissivo è quel meccanismo tecnologico che consente il passaggio di informazioni da una “sorgente” detto trasmettitore ad una “destinazione” detto ricevitore. Tale trasferimento avviene tramite un mezzo trasmissivo.

Scopo del sistema trasmissivo è portare un’informazione dalla sorgente alla destinazione , sia essa una variazione di tensione, di temperatura o di un qualsiasi valore misurabile.

Il mezzo trasmissivo può essere elettrico (cavi), wireless (onde radio), fibra (luce) e aria (luce ,li-fi).

I mezzi trasmissivi possono essere suddivisi in 2 grandi “categorie” : portanti fisici e portanti radio. I primi si definiscono tali se si realizza un collegamento senza soluzione di continuità tra l’estremità trasmittente e la ricevente o tra alcune parti dei dispositivi coinvolti nella trasmissione . Fanno parte di questa famiglia le linee in rame e la fibra ottica. I portanti radio inglobano tutte le apparecchiature del sistema stesso nei 2 centri di ricezione e trasmissione in quanto il mezzo è costituito dallo spazio aperto. Fanno parte di questa famiglia i ponti radio terrestri e ponti satellitari, in futuro ne faranno parte anche ponti li-fi.

In generale, i mezzi trasmissivi attenuano i segnali in proporzione alla distanza percorsa e alla frequenza del segnale e propagano i segnali a velocità proporzionali alle loro frequenze. Di conseguenza per qualunque mezzo trasmissivo, la banda passante si riduce all’aumentare della lunghezza del mezzo stesso.

La scelta del mezzo trasmissivo è importantissima e deve essere legata al tipo di trasmissione dell’intero sistema impiegato consentendo il trasferimento di segnali che appartengono ad un certo campo di frequenze.

I mezzi trasmissivi che vengono impiegati per trasmissioni di tipo analogico devono consentire il trasporto dei segnali mantenendo inalterate le forme d’onda originarie in funzione del tempo. Quelli impiegati invece per trasmissioni di tipo numerico (bit) devono consentire il riconoscimento del valore $v(t)$ (il valore in un determinato istante) per poterlo restituire in modo corretto.

Sicuramente il sistema di trasmissione con più ampi margini di sviluppi futuri è la fibra ottica, che associa ad un costo basso, altissime potenzialità di trasmissione, leggerezza a parità di banda (due fibre sono più capaci di 1.000 doppini, 100 kg/km contro 8.000 kg/km), totale insensibilità a disturbi elettromagnetici, difficili da bypassare per spiare il traffico

1.2 Il mezzo ottico

In realtà lo sviluppo della fibra è stato “frenato” dal mezzo, il vetro, che si pensava potesse essere il conduttore perfetto di un segnale luminoso e **che** fu inizialmente scartato a causa delle perdite troppo elevate dopo i primi deludenti esperimenti negli anni '50 che prevedevano l'utilizzo di un cilindro di vetro immerso nell'aria come mezzo trasmissivo.

Le grandi “incognite” che non facevano decollare lo sviluppo di trasmissione ottica erano: sorgenti luminose poco potenti e mezzo di trasmissione con perdite elevate.

La svolta si ebbe nel 1960 quando Theodore H. Maiman realizzò e brevettò il primo laser con un rubino avvolto in una spirale di vetro racchiuso in un cilindro cavo di alluminio. Tale scoperta diede nuova linfa allo sviluppo di un mezzo trasmissivo che potesse sfruttare a pieno la nuova potenza del laser e la soluzione arrivò nel 1966 quando Kao e Hockman pensarono di inserire il cilindro vetroso all'interno di un altro cilindro con una densità di riflessione molto più bassa. Nacque l'antenato della fibra ottica. Ai risultati positivi, bisognava comunque mettere in evidenza perdite di segnale dell'ordine di 1000 db/km. Per capire come si è riusciti a “migliorare” il mezzo trasmissivo (vetro), bisogna risalire alle caratteristiche chimico-fisiche del materiale stesso: il vetro presenta una struttura amorfa e non cristallina e fino a dimensioni di qualche decina di nanometri è completamente casuale, pertanto il vetro comune che si ottiene dalla Silice (polvere di quarzo), Carbonati di Sodio o Calcio ed Ossidi di Piombo, è scarsamente trasparente. Nella prima metà degli anni '70 venne messo a punto un sistema noto come Chemical Vapor Deposition (CVD), il processo consiste nel far avvenire la reazione $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2 \text{Cl}_2$ ad alta temperatura sulla superficie di un tubo che viene ruotato e traslato per far sì che il prodotto di reazione venga distribuito in maniera uniforme

(meccanicamente è uno strumento molto simile ad un tornio). Quello che si forma è una polvere finissima (soot, in italiano “fuliggine”) che fusa va a formare una barra consistente di vetro. La capacità di iniziare il processo con precursori purissimi fa sì che prenda vita un vetro eccezionalmente trasparente e con finestre ottiche dai 200 ai 3500nm di lunghezze d’onda.

Le prime migliorie tecniche apportate sul mezzo trasmissivo (vetro) riuscirono a portare le perdite di segnale nell’ordine di 20 db/km. Era un buon punto di partenza, anche se molto lontano dagli attuali 0.2-0.22 db/km per le fibre commerciali e 0.18 per fibre “d’avanguardia”.

L’attuale struttura di una fibra ottica presenta una parte interna detta core di materiale vetroso o plastico con una buona flessibilità (anche il vetro in un stato filamentoso presenta un’ottima flessibilità). Il core è ricoperto da una parte più esterna che prende il nome di cladding, anch’esso di vetro, ma con un indice di rifrazione molto più basso, il tutto è rivestito da un terzo strato chiamato coating per lo più di materiale plastico.

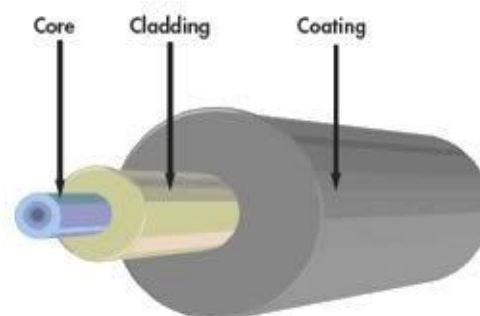


Fig.1

Struttura fibra ottica (Fig.1)

I parametri fisici della fibra da prendere in considerazione sono:

a: il raggio del core

b: raggio del cladding

$n_1 = c/v_1$ indice di rifrazione del core

$n_2 = c/v_2$ indice di rifrazione del cladding

dove $c = 3 \times 10^8$ m/s (velocità della luce nel vuoto)

v_1 = velocità della luce nel core

v_2 = velocità della luce nel cladding

inoltre

$n_1 > n_2$ $b \gg a$

Lo stesso meccanismo costruttivo del core viene utilizzando anche per il cladding, facendo infatti reagire sul “tornio” gas diversi si riesce a “calibrare” un vetro con indice di rifrazione differente rispetto al core, ma comunque prossimo a quei valori.

Ultimato il cladding si passa alla filatura, un processo particolare che avviene in impianti alti anche 50m detti per l'appunto torri di filatura.

All'interno di queste torri ci sono delle fornaci che operando un aumento controllato di temperatura della (oltre i 1500 °C)provoca una progressiva e controllata fusione del vetro che viene estratto dal forno in forma filamentosa. Per gravità il filo di vetro appena prodotto viene gradualmente raffreddato (mediante una serie di altri forni) previa l'aggiunta di uno strato plastico di ricopertura chiamato “coating” (di solito un materiale acrilico) ed, una volta completato il raffreddamento, avvolto in bobine di qualche decina di cm di diametro.

La fibra così ottenuta risulta avere anche delle ottime proprietà meccaniche, con un modulo di Yang (capacità di elongazione) pari quasi a quella di un filo di alluminio e con una fragilità che viene comunque compensata dal coating esterno. Con queste proprietà il cavo di fibra è ideale per essere posato per i più svariati usi (anche tratte sottomarine) e per tutte le condizioni di temperatura.

Come tutti i sistemi di trasmissione dati, la realizzazione del materiale, è il primo step di definizione delle prestazioni delle comunicazioni e i due parametri che influiscono sulle prestazioni della trasmissione in maniera sostanziale sono le perdite e la dispersione del segnale indotto dalla sorgente.

Considerando che il segnale ottico presenta una frequenza portante dell'ordine dei 100 THz e considerando che la parte di banda sfruttabile per i dati è di circa 1-2 % della portante, si comprende che teoricamente è possibile realizzare sistemi di comunicazione con una banda disponibile superiore a 1THz.

L'evoluzione dei processi costruttivi della fibra ha fatto sì che le prestazioni delle trasmissioni che la sfruttano siano cresciute di molto in (relativamente) pochi anni.

Tale evoluzione può essere schematizzata in cinque generazioni :

Prima generazione : realizzati fine anni '70 , bit rate di 45 Ms/s con lunghezza d'onda di 0.8 μ m, distanza ripetitori circa 10km

Seconda generazione : primi anni ottanta , lunghezza d'onda di 1.3 μ m . Prima con fibre multimodo, soffrivano di limitazioni grazie alla dispersione modale, in seguito

con fibre a singolo modo hanno raggiunto bit rate di 1.7 Gb/s e distanza di trasmissione tra i ripetitori di circa 50km.

Terza generazione : realizzata nel 1990 , sistemi operanti su lunghezza d'onda di 1.55 μm con perdite minori di 0.2 db/km. Arriva a bit rate superiori a 4gb/s con distanze tra ripetitori oltre i 100km. In questi sistemi veniva utilizzato il fotodetector che fungeva da repeater di segnale ottico, traducendo dapprima il segnale da ottico in elettrico , per poi rimetterlo nuovamente sotto forma ottica all'interno della fibra.

Quarta generazione o generazione degli amplificatori ottici : utilizzano la tecnica della moltiplicazione a divisione d'onda (WDM). Negli anni '90 si riuscirono a realizzare sistemi con bit rate di 5 Gb/s su distanze di 14300 km.

Quinta generazione: solitoni e dispersion management. Con i sistemi a solitoni si è riusciti a raggiungere capacità di singolo canale di 20Gb/s su distanze transoceaniche.

1.3 Funzionamento trasmissione ottica

Lo studio della trasmissione del segnale generato dalla sorgente avviene con l'ipotesi di validità dell'ottica geometrica. Le fibre ottiche trasmettono sfruttando il fenomeno della riflessione totale interna. Un raggio luminoso che incide su una superficie di interfaccia tra due materiali con indice di rifrazioni diversi, viene in parte riflesso in parte rifratto secondo la nota Legge di Snell: $n_1 \cdot \sin(\alpha) = n_2 \cdot \sin(\beta)$.

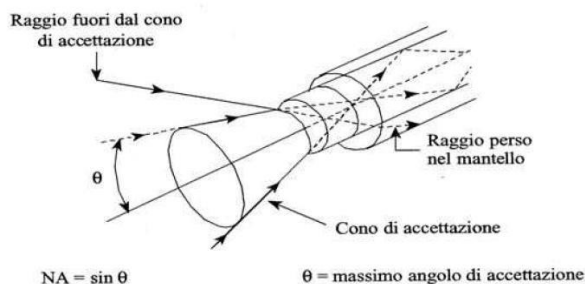
Fig(2)



Fig.2

L'angolo di incidenza della luce oltre al quale si ha assenza di rifrazione è $\Phi_L = \alpha_L = \arcsin(n_2/n_1)$ chiamato angolo limite (Fig3.)

Fig3.



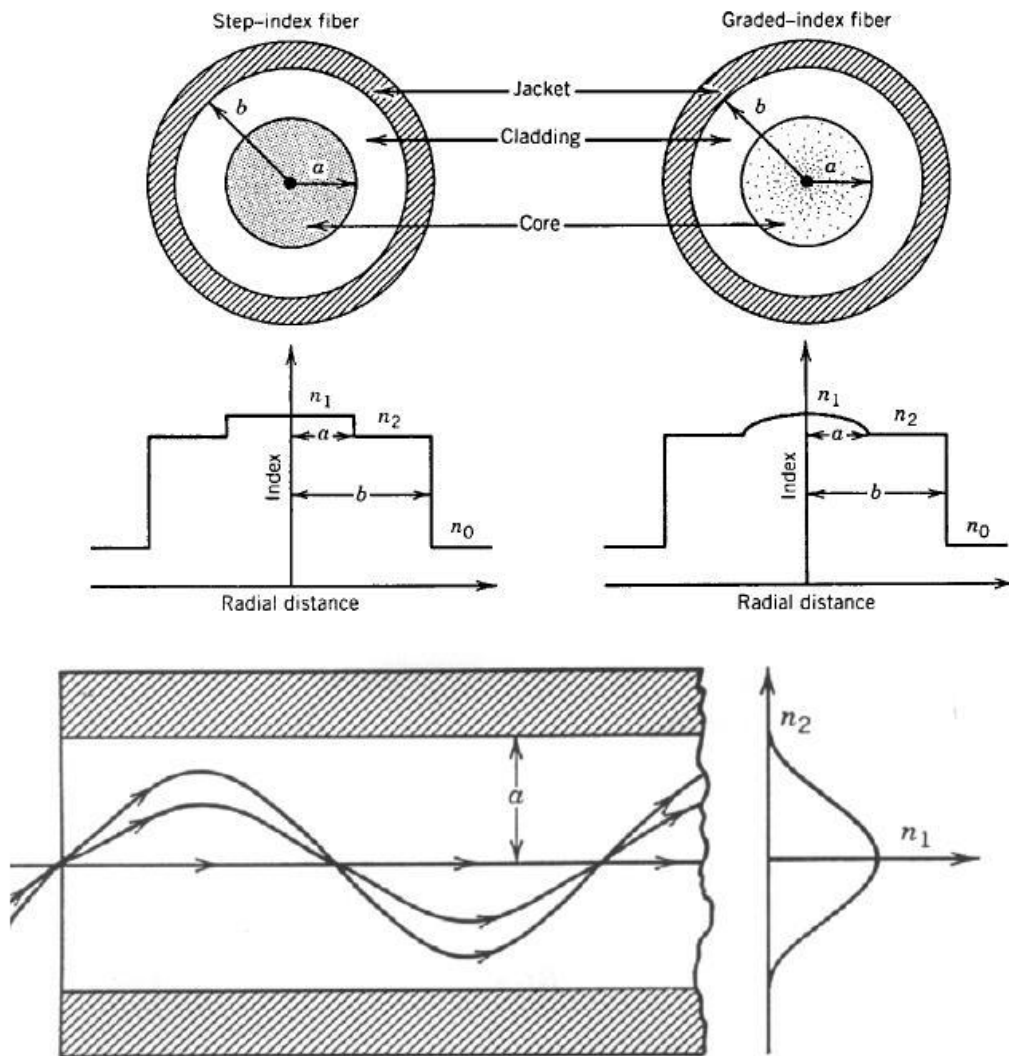
Al di fuori di tale angolo il raggio viene rifratto sul mantello e viene “perso”.

Un parametro molto importante in ottica è NA, detta apertura numerica $NA = \sqrt{(n_2^2 - n_1^2)}$ è un numero adimensionale in genere varia da 0.3 a 0.1 indica il numero di modi in cui può propagarsi la fibra. Una fibra capace di trasportare diversi modi viene detta multimodale e i rispettivi modi possono essere visti come i raggi che si propagano lungo le diverse direzioni. I diversi modi, a causa di angoli di riflessione diversi, percorrono distanze diverse, dando vita a quella che viene chiamata dispersione modale. Queste differenze dei vari modi del segnale possono essere abbastanza consistenti dell'ordine di 10ns per km.

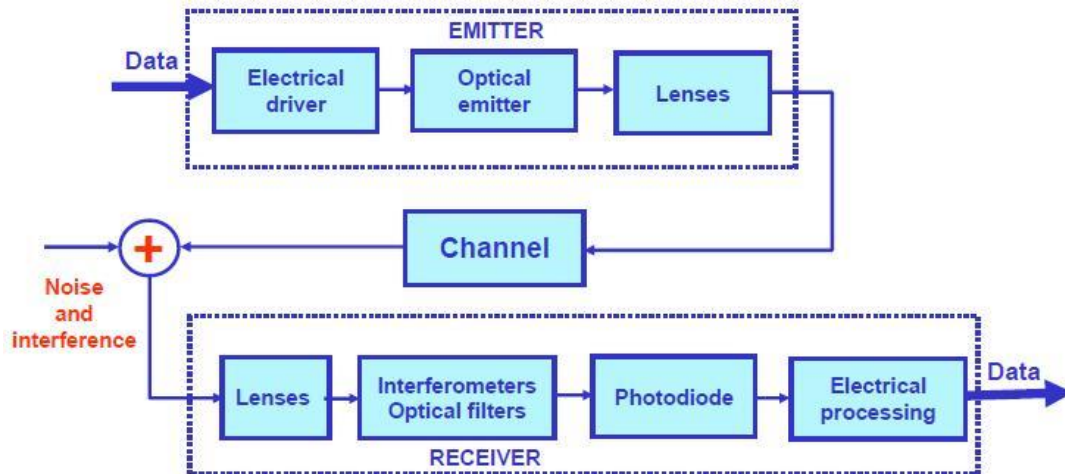
Uno degli accorgimenti per ridurre la dispersione modale è strutturale e si chiama fibra Graded-index che differisce dalla Step-index per la variazione graduale dall'indice n_1 all'indice n_2 .

E' semplice immaginare come il raggio che procede in un modo più obliquo percorre più “strada” ma trova meno “resistenza”, quindi la percorre più velocemente.

Questo tipo di fibre arrivano a bit rate di 100 Mb/s su distanze più grandi di 100km. Il rovescio della medaglia è che queste fibre sono usate raramente per le lunghe distanze a causa di perdite dell'ordine di circa 50 db/Km, il loro utilizzo è spesso limitato ai trasferimenti LAN (di solito entro 0.5 km).



La trasmissione su mezzo ottico può essere schematizzata con il seguente diagramma a blocchi:



L'Electical driver genera correnti per l'emettitore ottico e le adatta per il segnale di ingresso, l'emettitore converte queste correnti in segnali luminosi che vengono resi "adatti" al canale tramite opportune lenti .Sul canale trasmissivo (fibra) vengono "aggiunti" vari tipi di disturbi, attenuazione e rumore. La macrostruttura del ricevitore opera la conversione inversa: tramite opportune micro lenti e filtri il segnale luminoso viene reso "leggibile", isolando diverse lunghezze d'onda (WDM) e scegliendo particolari canali. Infine il fotodiode si preoccupa di una conversione da ottico ad elettrico, ed infine il segnale elettrico viene "processato" ed elaborato sotto forma di dati.

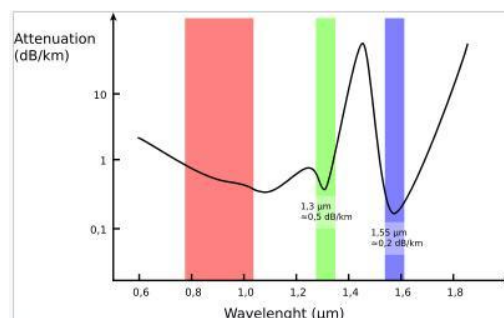
2. PROPAGAZIONE DEL SEGNALE OTTICO

2.1 Emettitore

Il compito dell'emettitore è la conversione da segnale elettrico (applicato all'ingresso) a segnale ottico. Le sorgenti maggiormente utilizzate sono i LED (light emitting diodes) e i LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) Di solito il led viene utilizzato per applicazioni a basso costo e dove si abbia bisogno di un bit rate contenuto. Quando il segnale viene inviato attraverso dall'emettitore all'interno della fibra ottica, subisce sempre un'attenuazione all'interno del core che può dipendere da:

- La diffusione (scattering) di Rayleigh dovuta dall'interazione della luce con la struttura molecolare del core e con gli atomi di eventuali impurezze
- Assorbimento dovuto alle impurezze presenti nel core che assorbono e dissipano energia sotto forma di calore
- Perdita per piegature tra core e cladding tra cui microbending (da fabbricazione o da eccessivi tiraggi o pressioni durante l'installazione) e macrobending (dovuta ad piegature sul raggio di curvatura troppo piccole).

La fibra intesa come mezzo trasmissivo ha tre zone “trasmissive” ottimali chiamate finestre trasmissive e gli emettitori in di sorgenti luminose siano essi LED o LASER lavoreranno su queste finestre per ricavare una trasmissione con meno disturbi.



I LED sfruttano la proprietà della fotoemissione: in presenza di eccitazioni dovute ad una campo elettromagnetico emettono energia sotto forma di luce. Molti semiconduttori quali ad esempio fosforo di gallio (GaP) o arsenurio di gallio (GaAs)

godono di queste proprietà e drogati con zinco e selenio sono utilizzati per realizzare i led. Il LED utilizzati come emettitori per fibre sono realizzati con procedure particolari in quanto la luce emessa deve essere confrontabile con le dimensioni del core della fibra da accoppiare. Le strutture più comuni sono:

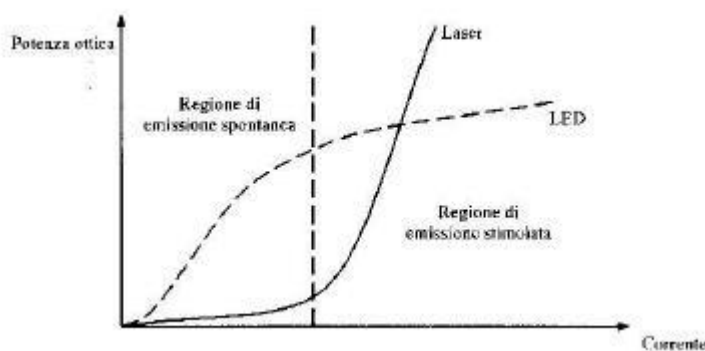
- Eterogiunzione planare
- Burrus
- Edge-emitting (differisce dagli altri due, per l'emissione della luce da una fessura laterale)

Inoltre i LED per loro natura generano una luce incoerente, vale a dire una luce che è la somma di una serie di raggi con frequenze diverse che vanno dal violetto (circa 380 nm) frequenza più alta, al rosso (circa 780 nm) frequenza più bassa. Affinchè si realizzi una sorgente di luce bisogna favorire un'emissione stimolata che può essere ottenuta realizzando un risonatore (Fabry-Perot) sulle superfici opposte del diodo.

2.2 Il Laser

Alla base del funzionamento del laser ci sono tre fenomeni di interazione radiazione-materia:

- Emissione Spontanea
- Emissione stimolata
- Assorbimento



Nell'emissione spontanea, un elettrone che partendo dallo stato energetico E_1 venga portato ad uno stato energetico E_2 con $E_2 > E_1$ tenderà a liberarsi dell'energia acquisita emettendo una radiazione. L'energia ceduta avrà frequenza:

$$\varphi = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

Dove

h = costante di Plank

$h^* \varphi = E_2 - E_1$ E' il fotone ossia la minima quantità di energia elettromagnetica

Il numero di elettroni che passano dallo stadio E_2 allo stadio E_1 per unità di tempo è definito:

$$\frac{dn_2}{dx} = -A \times n_2$$

Con A = probabilità di emissione spontanea

$T = 1/A$ vita media

Nell'emissione stimolata un elettrone che si trova nello stato energetico E_2 viene colpito da un fotone di energia coincidente a quella che lui stesso può generare spontaneamente ($h^* \varphi = E_2 - E_1$). Questo elettrone cede un altro fotone di energia pari a $h^* \varphi = E_2 - E_1$

Pertanto si avrà:

$$\frac{dn_2}{dt} = -W_{21} \times n_2$$

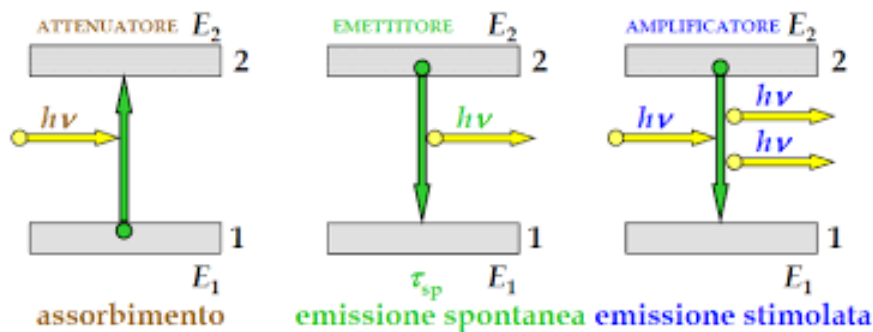
Dove W_{21} è la probabilità di emissione stimolata.

Nell'assorbimento se un elettrone si trova in uno stato energetico E_1 e viene colpito da un fotone $h^* \varphi = E_2 - E_1$ assorbe il fotone e passa allo stato E_2 .

$$\frac{dn_1}{dt} = -W_{12} \times n_1$$

Con W_{12} probabilità di assorbimento

Riassumendo i 3 stati graficamente si ha:



E' da notare che a parità di condizioni (stessa intensità di energia stimolante, stesso materiale) le probabilità di emissione stimolata e di assorbimento sono uguali ,cioè $W_{21}=W_{12}$, pertanto in condizioni di equilibrio questi due processi tenderanno a compensarsi. Affinchè prevalga l'amplificazione , si dovrebbe avere

$$\frac{dn_2}{dt} > \frac{dn_1}{dt}$$

Cioè il numero di atomi per unità di tempo che si muovono per emissione stimolata sia maggiore del numero di atomi per unità di tempo che si muovono come "assorbitori". Tale condizione non viene soddisfatta a causa dell'equivalenza tra probabilità di emissione stimolata e di assorbimento, pertanto l'unico parametro che può influenzare l'amplificazione è:

$$n_2 > n_1$$

Questa condizione viene detta inversione di popolazione. E' da notare che per $n_2 < n_1$ il materiale si comporterebbe da assorbitore, mentre per $n_2 = n_1$ il materiale ha un comportamento trasparente.

Il laser è un particolare tipo di oscillatore ottico costituito da:

- un materiale attivo nel quale è possibile per effetto di un pompaggio operare una inversione di popolazione
- un risonatore ottico costituito da due specchi posti ad opportuna distanza , un dei quali parzialmente riflettente. Esistono molti tipi di risonatore ottico si ricorda il risonatore a specchi piani e paralleli, il risonatore simmetrico concentrico o sferico, il risonatore simmetrico confocale, e i risonatori con configurazioni non simmetriche.

I materiali utilizzati per realizzare i mezzi attivi dei laser (gas molecolari, semiconduttori, rubino, ed altri) sono in realtà caratterizzati da bande di energia costituite da moltissimi sottolivelli energetici. Sono quindi possibili numerose transizioni energetiche, e quindi si può realizzare l'inversione di popolazione per parecchie coppie di livelli energetici. In definitiva, pompando opportunamente il mezzo attivo, questo presenta un guadagno non soltanto per una frequenza, ma per una banda estesa di frequenze: anziché fornire una riga di guadagno, presenta una curva di guadagno. Il mezzo attivo si occupa dell'inversione di popolazione mentre il risonatore ottico si occupa di instaurare diverse configurazioni di campo (modi). Ad ogni "passaggio" i modi che si trovano in corrispondenza a valori di guadagno del mezzo attivo superiori del valore critico vengono amplificati e aumentano di ampiezza fino a raggiungere la condizione di regime.

Il laser "classico" permetterebbe di realizzare sistemi di bit rate di "solo" 1Mb/s ma grazie a varie tecniche come il Q-Switching e il Mode Locking il bit rate viene ampliato fino e oltre al Gb/s. Il Q-Switching (commutazione fattore di qualità) si basa sull'introduzione all'interno della cavità di un interruttore che varia il fattore di merito della cavità stessa, ossia le sue perdite. Attraverso la commutazione periodica di tale interruttore è possibile realizzare un treno di impulsi. Il mode locking (agganciamento delle fasi) è una tecnica che permette di ottenere impulsi ultracorti dai ns fino ad alcune decine di fs, rendendo costante o nulla la differenza di fasi tra due modi di propagazione consecutivi in cavità.

2.3 Amplificatore

L'amplificatore si contraddistingue dal laser per una grande differenza : mentre il primo deve operare su bande molto ristrette, il secondo al contrario opera su bande ben più larghe, anzi in linea "ideale" dovrebbe amplificare su tutta la finestra di trasmissione della fibra. Il meccanismo dell'amplificazione , come detto in precedenza si attiva quando si effettua un'emissione stimolata in un mezzo ove sia realizzata un'inversione di popolazione

Le relazioni che caratterizzano un amplificatore ottico sono:

$$P_{out}=GP_{in}+P_n$$

Dove

P_{out} = potenza di uscita

P_{in} = Potenza di ingresso

$P_n = nsp(G-1)B$

Con

$$nsp = \frac{n_2}{n_2 - n_1}$$

B = banda amplificatore

G = Guadagno

In condizioni ideali $n_1=0$ che comporta $nsp=1$ causando una figura minima di rumore $F=2$ (3dB).

La grande “rivoluzione” dell’amplificatore ottico è dovuta alla differenza sostanziale dall’amplificatore elettrico: mentre quest’ultimo per ripristinare il corretto flusso di informazioni, doveva operare una duplice conversione da ottico a elettrico e viceversa, l’amplificatore ottico opera direttamente nel “dominio” dell’ottica eliminando o comunque ridimensionando una pesante strozzatura. Con l’amplificatore ottico si può dire che la comunicazione in fibra è diventata trasparente di fatto. Inoltre, rispetto alle tecniche tradizionali, l’impiego degli amplificatori ottici come pre-amplificatori riduce l’impatto del rumore “termico”, prevalente nei ricevitori di intensità, a fronte di un incremento del rumore “fotonico” dovuto all’ASE (Amplified Spontaneous Emission).

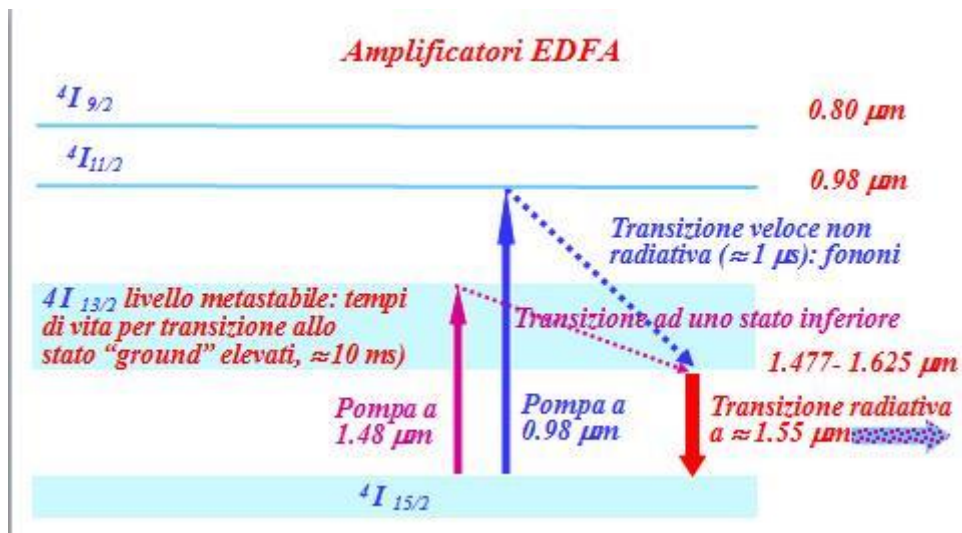
I dispositivi utilizzati sono, “classicamente”, di due tipi:

- amplificatori in fibra drogata, ove, in un tratto di fibra (di qualche decina di metri), drogata con materiali opportuni (ad es., erbio, EDFA, Erbium Doped Fibre Amplifier), è ottenuta l’inversione di popolazione per tali materiali, mediante pompaggio ottico (laser a semiconduttore di pompa);
- amplificatori a semiconduttore (SOA, Semiconductor Optical Amplifier), tipicamente con struttura di tipo Fabry-Perot, pompati elettricamente, mediante iniezione di corrente, impedendo la possibilità di oscillazione, con l’eliminazione della riflessione alle facce della cavità ottica attiva.
- amplificatori Raman
- amplificatori in fibra drogati con altre terre rare per nuove bande, ad esempio, il Tulio per la banda S (1460 - 1530 nm).

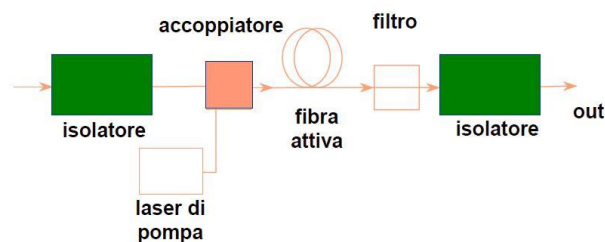
2.3.1 Amplificatori in fibra drogata

L'amplificatore principe in fibra drogata è considerato l'erbio. Opera nella regione di 1.5 μm con una banda che si avvicina ai 20 THz.

L'amplificatore in fibra drogata agisce grazie a degli agenti che vengono aggiunti in fase costruttiva all'interno della fibra stessa, in questo caso l'erbio in fase di costruzione viene aggiunto sotto forma di sale (ErCl_3) che reagirà con la silice (SiO_2) dissociandosi in Er^{3+} e 3Cl^- . Gli ioni Er^{3+} rimarranno intrappolati nel reticolo in fase di raffreddamento. Tali ioni hanno una struttura energetica a livelli (anche se i livelli $4I_{15/2}$ – ground – $4I_{13/2}$ sono ulteriormente articolati rispettivamente in 8 e 7 sottolivelli: effetto Stark), e non a bande come nei semiconduttori, che presentano transizioni radiative utili per la III finestra. Di seguito diagramma energetico degli ioni di Erblio nelle fibre in silice. Nella silice vi sono ioni Er^{3+} , ovvero atomi di erblio che hanno perduto tre dei loro elettroni esterni



E' da sottolineare come per l'amplificatore ad Erblio l'inversione di popolazione venga innescata da un altro laser detto laser di pompa con il seguente schema



Di solito viene usato un laser a semiconduttore con una lunghezza d'onda di 980 nm (basso rumore, banda più stretta) o a 1480 nm (rumore lievemente più alto ma

banda più ampia). Il raggio laser di pompaggio può avere la stessa direzione del raggio da amplificare (pompaggio copropagante), oppure la direzione opposta (pompaggio contropropagante), oppure entrambe le direzioni contemporaneamente. Il pompaggio a 980 nm consente un'inversione più completa con minore rumorosità, quindi, guadagni maggiori (tipicamente 10 dB/mW contro 5 dB/mW) e minore cifra di rumore.

Le prestazioni migliori si hanno in presenza di entrambi i pompaggi perché si ottiene una distribuzione più uniforme di N_2 lungo z . Il guadagno di questi amplificatori dipende anche da altri droganti oltre all'erbio, quali ossido di germano e allumina, che vengono inseriti per aumentare l'indice di rifrazione e allargare lo spettro di guadagno. La potenza della pompa (laser a 1480 o 980 nm) è assorbita dagli ioni di Erblio nella fibra drogata. Il segnale ottico di ingresso stimola gli atomi di erblio ad emettere un segnale ottico "coerente" con quello di ingresso, con guadagno: banda di guadagno 1525-1570 nm (C e L), picco a 1532 nm.

Da segnalare come effetti collaterali negativi l'emissione spontanea da parte degli atomi di erblio, associata a un "fondo" di luce e rumore ottico (ASE).

Tra i vantaggi degli EDFA, semplice ed efficiente accoppiamento alle fibre e alta potenza di saturazione di uscita (maggiore a 1480 nm rispetto a 980 nm: tipicamente, 5 dBm a 980 nm, 20 dBm a 1480 nm).

Anche se di solito gli amplificatori ad Erblio operano tra 1530-1560 nm, in particolari configurazioni si riesce a farli operare tra 1570-1590 nm (banda L), infatti l'erblio presenta un picco anche nella suddetta banda. Bisogna segnalare anche alcuni aspetti "critici" degli amplificatori EDFA, tra cui la larghezza di guadagno limitata e non uniforme a livello spettrale.

Inoltre la regione di guadagno si estende per "soli" 30nm (attorno al 1550nm), e considerando che la terza finestra ha una disponibilità di circa 150nm, si vede come la terza finestra venga solo parzialmente sfruttata dagli amplificatori EDFA.

Infine un EDFA è in grado di amplificare circa 40 canali in DWDM con una spaziatura di 100GHz, quindi un'ulteriore incremento della capacità potrebbe essere ottenuto riducendo la spaziatura dei canali, ma ciò introdurrebbe altri fattori critici tra cui maggiore vulnerabilità alla distorsione non lineare, e la richiesta di maggiore

stabilità in frequenza e selettività dei filtri. La riduzione della spaziatura dei canali, sarà probabilmente uno degli sviluppi futuri che riguardano gli EDFA .

Lo sfruttamento completo della banda disponibile è stato ottenuto solo di recente con l'utilizzo di opportuni filtri equalizzatori e con l'impiego di fibre attive fluorozirconate (EDFFA , erbiun doped fluoride fibre amplifier). E' stata dimostrata la fattibilità di fibre operanti in banda L (attorno a 1580nm) e sono stati sviluppati degli amplificatori a Tullio , capaci di operare nella banda S (1480-1520 nm) oltre a nuove matrici vetrose tra cui quelle drogate con tellurio in grado di fornire bande di amplificazione più ampie.

2.3.2 Amplificatori a semiconduttore

L'amplificatore ottico a semiconduttore altro non è che un laser a cui vengono tolte o si riduce la riflettività alle faccette laterali riflettenti, le riflessioni alle facce della cavità attiva vengono ridotte a valori $<0.1\%$.

Nell'amplificatore a semiconduttore l'inversione di popolazione è ottenuta tramite l'iniezione di corrente di polarizzazione, pertanto a differenza degli EDFA , la pompa è di tipo elettrico.

Sono caratterizzati da elevata larghezza di banda (circa 10THz), ma è da segnalare una dimensione molto contenuta del dispositivo, un costo basso e una potenza di lavoro contenuta oltre il basso costo (comparabile con quello del laser di pompa per gli EDFA) , bassa potenza molte bande possibili (ad esempio, 6 bande tra 1200 e 1650 nm) facile integrabilità (preziosa, ad esempio, nei commutatori ottici).

Di solito causano distorsioni di forma d'onda in regime di saturazione e non sono adatti per sistemi ad alto bit rate, ma operando in regime di non linearità possono essere utilizzati come convertitori di lunghezza d'onda. Uno dei vantaggi degli amplificatori ottici è quello di amplificare un gran numero di canali WDM. Idealmente, il segnale di ciascun canale dovrebbe essere amplificato della stessa entità: in pratica però, nei SOA, alcuni fenomeni non lineari inducono intermodulazione intercanale, una forma di disturbo molto critica, se non convenientemente minimizzata.

I principali fenomeni non lineari nei SOA sono la saturazione di guadagno e il Four Wave Mixing (FWM)

2.3.3 Amplificatore Raman

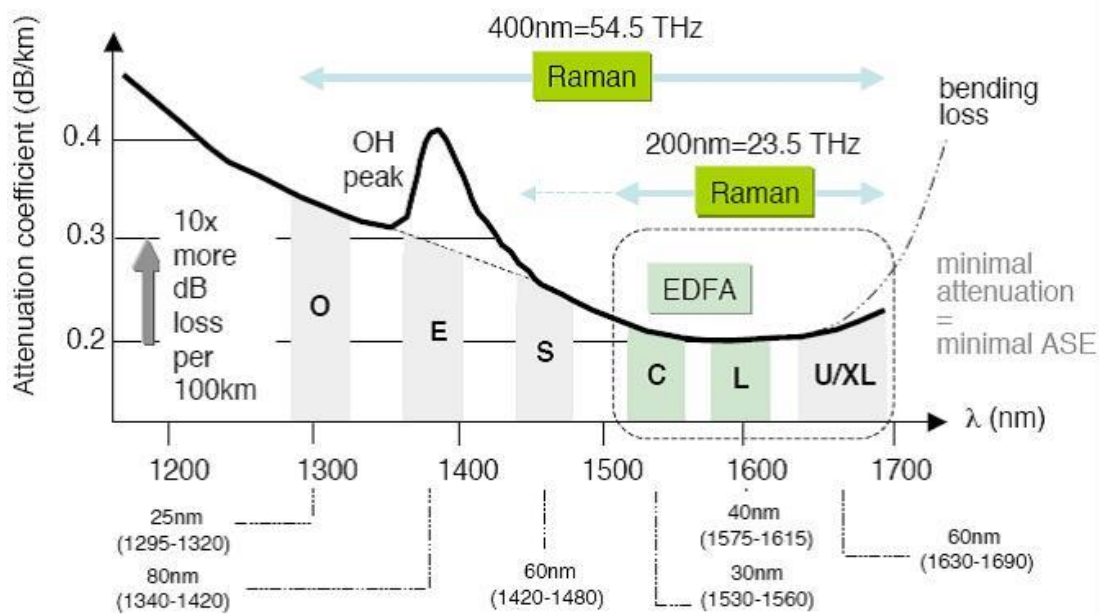
Si ha amplificazione distribuita di un segnale spostato in lunghezza d'onda del suddetto shift, che si propaga nello stesso materiale ove è presente la pompa ottica: la fibra stessa è sede di amplificazione.

E', intrinsecamente, un effetto "debole", che richiede elevate lunghezze di fibra (tipicamente, decine di km) e alte potenze di pompa (dell'ordine di 25- 30 dBm).

La pompa può essere co-propagante o contro-propagante (esempio in figura) rispetto al segnale. Se la lunghezza d'onda della pompa è opportuna, amplifica qualunque lunghezza d'onda di segnale. Tra i punti di forza degli amplificatori Raman sono da segnalare la bassa cifra di rumore dovuta al basso valore di ASE ($n_{sp} = 1$) e le lunghe tratte di amplificazione, con minori dislivelli di intensità rispetto all'uso di EDFA, con minori problemi da non linearità e maggiore SNR. Inoltre gli amplificatori Raman possono essere aggiunti agli amplificatori EDFA, in qualità di pre-amplificatori (amplificazione ibrida); ciò consente di realizzare tratte molto lunghe, con una serie di amplificatori, senza necessità di costosi rigeneratori, sino a bit-rate di 40 Gbit/s. Poiché la curva di guadagno trasla con la lunghezza d'onda della pompa, questo tipo di amplificatore consente lo sfruttamento di nuove bande ottiche possono.

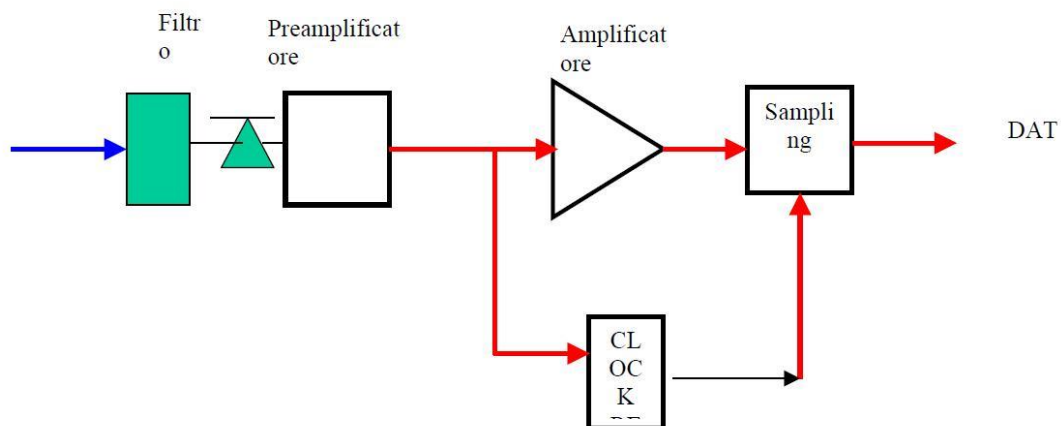
Da sottolineare che le intensità delle pompe possono essere messe a punto allo scopo di ottimizzare la risposta dell'amplificatore (guadagno costante su un intervallo spettrale ampio). A questi vantaggi e alla semplice architettura di amplificazione si contrappongono altrettanti svantaggi tra cui: bassa efficienza di pompa, la dipendenza dalla polarizzazione (impiego di pompe ortogonali), le alte potenze nei componenti e nelle fibre (migliorare il packaging, laser affidabili, connettori "puliti"), la variabilità in campo del guadagno in fibra (controllo della pompa).

Nello schema che segue si può notare come l' amplificazione Raman e EDFA siano compatibili per lavorare in sinergia



2.4 Il Ricevitore ottico

Il ricevitore ottico digitale ha il compito di convertire il segnale ottico ricevuto in un segnale elettrico e di determinare, osservando il segnale in un periodo di bit, quali tra i due possibili segnali sia stato trasmesso.



Il segnale proveniente dalla fibra ottica, opportunamente focalizzato da un accoppiatore di canale viene rilevato attraverso un fotodetector ad elevata impedenza (APD o diodo Pin) Possiamo definire il fonorivelatore quindi come quel dispositivo elettronico che converte in un modo efficiente la potenza ottica in

potenza elettrica ovvero la potenza ottica in corrente elettrica. Il segnale elettrico di basso livello ottenuto in uscita dal fotorilevatore viene amplificato utilizzando un preamplificatore (amplificatore a basso rumore). Quest'ultimo componente è importantissimo per ottenere delle buone prestazioni in termini di rumore del ricevitore. Segue poi l'amplificatore principale, che è dotato di sistema di controllo automatico del guadagno in modo da pilotare gli elementi seguenti del ricevitore ai livelli ottimali, prima di "passare" il segnale al blocco logico che si occupa del campionamento del segnale: si tratta di un dispositivo che ha il compito di recuperare il segnale di clock dal segnale che ha al suo ingresso, seguito da una porta logica di decisione; in questo modo il segnale è campionato negli istanti appropriati. Il segnale digitale seriale così ottenuto viene poi convertito in segnale parallelo, che viene poi demultiplexato per ottenere segnali a più basso bit rate, e viene poi inviato al resto del sistema.

Il ricevitore pertanto è costituito dai seguenti componenti:

- Fotodetector: dispositivo che converte la potenza ottica in potenza elettrica. Diversi materiali semiconduttori sono utilizzati per realizzare fotorivelatori: in particolare si osserva che il Silicio, il semiconduttore più utilizzato nella industria elettronica, garantisce una efficiente rivelazione solo sino a circa 1 micron di lunghezza d'onda. Quindi per le bande tipiche di comunicazione ottica, si debbono usare altri materiali, il principale di questi essendo il Germanio, le cui code di assorbimento arrivano sino alla terza finestra. Al fine di ottimizzare la fabbricazione dei componenti ed in particolare aumentare la banda elettrica di ricezione vengono oggi sempre più utilizzate leghe di materiali sia binarie (in particolare GaAs ed InP) sia ternarie che quaternarie. Un altro modo di aumentare l'efficienza del fotodiodo è quello di aggiungere fra il materiale "p" ed il materiale "n" uno strato di materiale cosiddetto "intrinseco" e formare in questo modo il fotodiodo "pin", uno dei più utilizzati nelle comunicazioni ottiche.
- Preamplificatore questo componente si occupa dell'amplificazione del segnale, molto debole, che proviene dal fotodetector, e della conversione della corrente ricevuta in una tensione. E' quindi un amplificatore di transimpedenza. La sensibilità e il rapporto segnale/rumore dell'intero

ricevitore dipendono in larga parte dalle prestazioni di questo componente: è quindi necessario porre estrema attenzione nel progetto del preamplificatore a basso rumore. I componenti bipolari tradizionali presentano normalmente caratteristiche peggiori rispetto ai FET per quanto riguarda il rumore. E' possibile ottenere prestazioni ancora migliori rispetto ai FET impiegando particolari dispositivi bipolari con banda allargata.

- **Amplificatore Principale:** fornirà un elevato guadagno , è dotato di un circuito di controllo automatico di guadagno (AGC) in grado di fornire ai livelli successivi un segnale adatto. Il segnale in uscita da questo amplificatore da questo punto in poi sarà differenziale.
- **Clock recovery e rigenerazione:** questo dispositivo si occupa di “sincronizzare” il ricevitore. I circuiti di recupero del clock per segnali NRZ (più utilizzati per elevati bit rate) si possono raggruppare sostanzialmente in due tipi: filtri ad anello aperto e sintonizzatori ad anello chiuso.

Ad anello aperto di solito vengono utilizzati per bit rate più elevati in quanto non soffrono di problemi di non linearità e instabilità. Lo svantaggio principale di questi circuiti è : la regolazione manuale del ritardo in modo da centrare il clock nell'intervallo del bit. Questa regolazione manuale non tiene conto di importanti parametri quali ad esempio la temperatura o l'invecchiamento del sistema stesso. Un altro importante svantaggio è che questo filtro è un componente esterno al sistema, pertanto presenta delle difficoltà dovute all'integrazione. I sintonizzatore hanno una complessità sicuramente superiore, che consente loro di operare una autoregolazione in base alle “condizioni ” del sistema. Un grande svantaggio consiste nel fatto che bisogna attendere qualche ciclo prima che il segnale di uscita sia agganciato al segnale di ingresso.

2.5 Il Rumore del ricevitore

Il ricevitore (in particolare il blocco logico del fotorivelatore) converte la potenza ottica in una corrente elettrica adatta alle successive elaborazioni. Anche nel caso in cui il ricevitore riceva un segnale ottico con una potenza rigorosamente la corrente in uscita dal ricevitore si presenterà fluttuante a causa del rumore. Il ricevitore è il maggior contribuente al rumore in un collegamento a fibra ottica. Il trasmettitore generalmente fornisce un elevato SNR (eccetto per il rumore modale del LD), è il collegamento in fibra non raccoglie interferenze elettromagnetiche (EMI) esterne.

Al ricevitore, l'ampiezza (e la potenza) del rumore è una frazione rilevante dell'ampiezza del segnale ricevuto. È perciò necessaria particolare cura nel progetto di circuito e nella scelta dei componenti. Nel caso di collegamento digitale, il diagramma ad occhio, ottenuto trasmettendo un segnale pseudo-random, permette di valutare il rumore. Le tre maggiori sorgenti di rumore nel ricevitore sono:

- Fluttuazione dell'ingresso ottico
- Il fotodiodo
- L'elettronica del preamplificatore.

Il rumore nell'ingresso ottico ha origine dal fatto che l'ingresso non è continuo, essendo composto di fotoni discreti. Il rumore che ne risulta è un limite fondamentale quantistico al rumore. Questo tipo di rumore solitamente non costituisce un problema per i collegamenti in fibra ottica, essendo la sua potenza molti dB inferiore alla potenza delle altre principali sorgenti di rumore. Tutti i processi di origine quantistica, come l'arrivo di un fotone, un flusso di corrente attraverso una giunzione, o una moltiplicazione per effetto valanga, generano rumore. La fluttuazione della corrente, dovuta ad un fenomeno quantistico, genera il rumore cosiddetto "shot". Un processo simile ha luogo anche per il meccanismo di collisione dell'effetto valanga. Inoltre il contributo al rumore dovuto all'amplificatore ha origine dal rumore "shot" nei transistor di ingresso e dal rumore termico in ogni resistore.

Il rumore totale è dato dalla somma dei tre termini di rumore, assumendo rumore incorrelato.

Il SNR è il rapporto tra la potenza ricevuta e la potenza del rumore:

$$SNR = \frac{(mI_p)^2}{\langle i_{np}^2 \rangle + \langle i_{nr}^2 \rangle + \langle i_{na}^2 \rangle}$$

Dove i_{np} , i_{nr} , i_{na} sono rispettivamente corrente generata da rumore shot, rumore del fotodiode e dal rumore della struttura del preamplificatore e I_p ampiezza media della corrente, con m indice di modulazione.

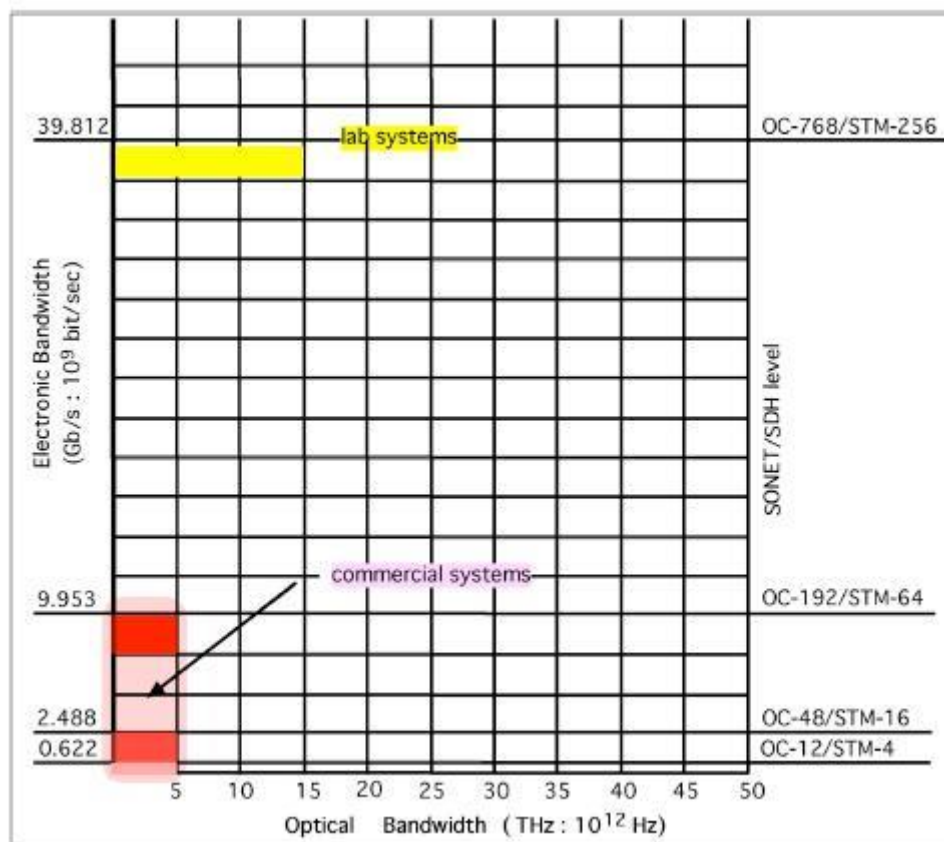
Nei ricevitori ottici tradizionali, il rumore “termico” e quello, analogo, prodotto dell’amplificatore elettrico sono normalmente predominanti, soprattutto con l’impiego di diodi PIN; con i diodi APD, ottimizzando il rapporto S/N l’influenza dei due tipi di rumore è più bilanciata.

Un preamplificatore ottico aumentando convenientemente la potenza ottica in ingresso al fotodiode, rende, sostanzialmente, trascurabile il contributo del rumore “termico” e di quello prodotto dell’amplificatore elettrico; filtrando opportunamente il rumore ottico, ASE, prodotto dall’amplificatore è, così, possibile realizzare ricevitori ad alta sensibilità.

3 TRASMISSIONI OTTICHE

E' difficile parlare in senso assoluto di "banda" delle fibre ottiche, perchè questa definizione male si applica a larghezze spettrali estese quali le fibre ottiche permettono: è meglio parlare di "finestre spettrali", cioè di larghe porzioni dello spettro entro le quali allocare le "portanti" che costituiscono il sistema di comunicazione ottica, ovvero le varie lunghezze d'onda. Le finestre spettrali a loro volta saranno definite una volta prefissato un certo valore di parametro caratteristico della fibra ottica: tipicamente l'attenuazione ma anche, in alcune applicazioni, la dispersione. Le nuove fibre ottiche, le nuove leghe di materiali semiconduttori e le nuove reti metropolitane, stanno ridefinendo le classiche "finestre spettrali" una volta conosciute come 1° finestra (attorno agli 800 nanometri) 2a finestra (attorno ai 1300 nm) e terza finestra (attorno ai 1550 nanometri). Sebbene quest' ultima rimanga ancora la finestra spettrale elettiva, oggi comincia a prevalere il concetto di una finestra spettrale estesa da 1250 sino oltre ai 1600 nm. La raccomandazione ITU G-695 stabilisce che caratteristiche debbono avere le fibre ottiche in questa ampia regione, sia in termini attenuativi che dispersivi, sia per fibre standard che per fibre "water free". Un'altra considerazione da fare è che possiamo considerare circa 54 THz di "finestre spettrali utili" unendo le 3 finestre. Ma questo valore è sicuramente variabile in base al tipo di trasmissione (e di mezzo) scelti e di sicuro di gran lunga lontano dall'enorme capacità messa a disposizione dalla fibra. Se per esempio consideriamo una fibra monomodale water-free si è visto che accettando una attenuazione inferiore a 0,5 dB/Km, esiste una finestra continua di oltre 50 THz capace di ospitare una comunicazione ottica: è questa la "banda analogica" della fibra ottica, l'intervallo in cui possiamo ospitare portanti di diverso "colore" con continuità . Questo spazio può essere "riempito" come meglio si crede tenendo presente solo la qualità trasmissiva cercando di non avvicinare troppo le portanti ottiche per evitare che i segnali modulanti interferiscano tra loro (diafonia). Le tecnologie che permettono questo sono diverse: la messa a punto di sorgenti a riga stretta e stabile nel tempo; la messa a punto di filtri ottici accurati e sintonizzabili; la messa a punto di formati trasmessivi che conservino la banda, ecc.

Esiste un secondo “asse” importante nelle comunicazioni ottiche che è l’asse del bit-rate ovvero della cadenza trasmissiva. Infatti la trasmissione dell’informazione con la portante ottica avviene mediante una modulazione temporale della potenza della portante. Essendo la portante ottica in terza finestra dell’ordine di 200 THz, è ragionevole pensare che la banda “modulante” possa estendersi sino a qualche decina di THz: in realtà non è così a causa di limiti fisico-tecnologici dei dispositivi di modulazione e dei componenti elettronici necessari per il loro controllo: con la tecnologia digitale oggi più avanzata si arriva a 100 Gb/s ma si possono immettere in fibra ottica anche impulsi di tipo solitoni con larghezze temporali di qualche psec e quindi con banda superiori al THz.. Questo asse è quindi l’asse delle bande elettriche ed è limitato dalla tecnologia dell’elettronica digitale (sia di trasmissione che di ricezione). Lo spazio delle comunicazioni ottiche sarà lo spazio delimitato da queste due “bande” (vedi figura): uno spazio straordinariamente grande e solo marginalmente occupato.



Con le tecnologie in commercio oggi la terza finestra è sfruttabile al massimo fino ai 64 canali in terza finestra alla cadenza di 10 Gb/s con separazione tipica di 50 GHz. La banda analogica occupata raramente supera i 5 THz, quella cioè degli amplificatori ottici. Con le tecnologie quasi-commerciali si estenderà questa capacità trasmissiva verso i 40 Gb/s ma ancora rimarrà come si vede dalla figura sopra riportata, un grande spazio di capacità trasmissiva sfruttabile. Idealmente, con le tecnologie oggi commerciali sarebbe già possibile trasmettere 1000 portanti separate ognuna 50 GHz sulla finestra di 50 THz della fibra ottica. Se ognuno di questi canali fosse modulato 10Gb/s, la complessiva capacità trasmissiva sarebbe di 10 Tb/s. Supponendo di trasmettere canali telefonici regolari da 64 Kb/s, con una singola fibra ottica si potrebbero quindi trasmettere già oggi:

$$\text{numero canali vocali} \frac{10 \times 10^{12}}{64 \times 10^3} = 156,25 \times 10^6$$

e la capacità disponibile sarebbe ancora lontano dall'essere saturata.

Escludendo l'uso di componenti e tecnologie interamente ottiche, ancora allo stadio di prototipi sperimentali, l'unica maniera per sfruttare la grande capacità della fibra è quella di ricorrere a sistemi multicanale, in cui ogni canale di trasmissione viene "aperto" indipendentemente dagli altri, "modulando una portante" su una particolare lunghezza d'onda. Si può realizzare così uno schema di moltiplicazione a suddivisione di lunghezza d'onda (WDM, Wavelength Division Multiplexing) che permette di aggregare più canali elementari (ad alta velocità) per realizzare collegamenti ad altissima capacità. Non esiste alcuna differenza di principio tra la WDM e la FDM impiegata nei sistemi elettrici di comunicazione; nell'ambito delle trasmissioni ottiche si indica con WDM una FDM con spaziatura tra le portanti, mentre si continua a parlare di FDM nel caso di WDM a spaziatura fitta, in cui cioè la spaziatura tra portanti è dell'ordine di grandezza della banda dei singoli canali B. La differenza sostanziale, come sarà chiaro in seguito, consiste nel fatto che il segnale ottico WDM può essere demultiplicato con filtri ottici e rivelato con ricevitori DD mentre i canali FDM possono essere ricevuti solo con demodulatori coerenti ad alta selettività.

Utilizzando il WDM si è dimostrato come i sistemi ottici di telecomunicazione possano trasmettere anche su distanze transoceaniche. Tuttavia anche i sistemi singolo canale, e cioè che sfruttano la sola moltiplicazione nel dominio del tempo (time division multiplexing TDM), hanno oggi raggiunto capacità eccezionali, ed in particolare la trasmissione a 10 Gb/s è resa oggi possibile su distanze transoceaniche mediante sistemi commerciali, mentre sistemi TDM operanti a 40 Gb/s saranno presto disponibili per operare fino a distanze dell'ordine del migliaio chilometri. Queste capacità sono state raggiunte grazie alla introduzione di tecniche che hanno permesso di compensare i principali effetti che degradano la propagazione in fibra ed in particolare la dispersione cromatica e la non linearità di tipo Kerr. In particolare proprio grazie ad un bilanciamento tra dispersione cromatica ed effetto Kerr è possibile il raggiungimento di alte capacità tramite la cosiddetta propagazione solitonica. Per molti anni si è assistito ad un dibattito scientifico riguardante il confronto tra due tipi di trasmissione digitale generalmente denominati Non-Return to Zero (NRZ) e Return to Zero (RZ). In pratica spesso questi due termini, che indicano la forma dell'impulso del singolo bit (rettangolare per NRZ e campana per RZ), venivano utilizzati per indicare due diversi regimi di propagazione che riguardavano il livello di potenza lungo la linea: il regime lineare, o di bassa potenza, per il formato NRZ e quello non lineare, o di alta potenza, per il formato RZ. In particolare per il formato RZ si intendeva quel particolare segnale denominato solitone.

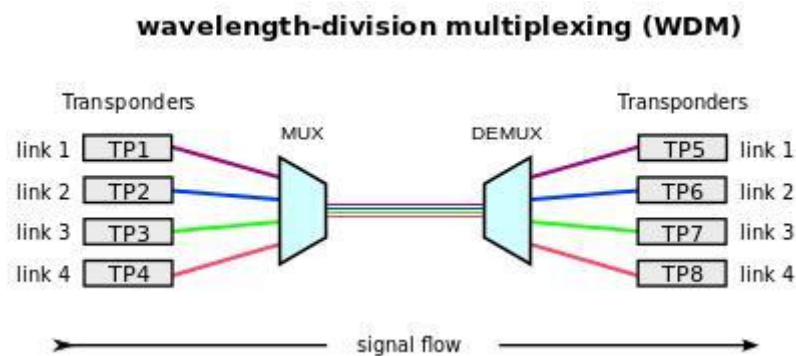
Il regime solitonico, in condizioni di propagazione con la stessa dispersione cromatica, nella regione anomala della fibra, permetteva di ottenere prestazioni migliori rispetto al caso NRZ, proprio perché l'effetto Kerr, nel regime solitonico, tende a compensare la dispersione cromatica in maniera molto efficiente. Tale compensazione per segnali NRZ è solo parziale. Tuttavia anche il regime solitonico mostrava molti limiti, specialmente in presenza di una alta dispersione cromatica, come nel caso delle fibre G.652. Solo qualche anno fa si è scoperto che il metodo più efficiente per ottenere altissime capacità era quello di compensare periodicamente lungo la linea la dispersione cromatica mediante particolari dispositivi come fibre speciali o reticoli (grating). Questa tecnica, denominata dispersion management, ha mostrato come una trasmissione a 40 Gb/s è possibile su distanze fino a 2000 km, in

collegamenti con fibre G.652. E' comunque da sottolineare il fatto che quando si prendono in considerazione sistemi con queste frequenze di cifra, non si può più parlare di regime lineare poiché le potenze che sono in gioco lungo la linea sono sempre molto elevate, specialmente quando si considerano lunghe distanze tra gli amplificatori, come richiesto da ovvie ragioni economiche. E' quindi inteso che quando si parla di una trasmissione con una frequenza di cifra superiore ai 2.5 Gb/s, operante su distanze superiori ai 200 km, si è sicuramente in un regime di propagazione in cui lo sfasamento prodotto dall'effetto Kerr non può essere trascurato, anche se l'evoluzione del segnale potrebbe sembrare molto simile a quello che avverrebbe in un regime di tipo lineare [8]. D'altro canto, in un sistema con dispersion management, non si potrebbe parlare di propagazione solitonica in maniera rigorosa, nel senso di un segnale che non cambia la sua forma e la sua durata lungo la distanza di propagazione; nel dispersion management gli impulsi presentano una variazione enorme sia in termini di durata che di forma. Ciò che si è osservato è che in un collegamento con dispersion management la propagazione di impulsi con un formato RZ è più stabile rispetto a quella con segnali NRZ, nel senso che gli impulsi, nonostante una grossa deformazione lungo la tratta di propagazione, tendono periodicamente a riassumere la forma trasmessa. Questa importante caratteristica fa sì che oggi per un sistema ad alta capacità è preferibile un formato di tipo RZ. A questa ragione se ne aggiunge un'altra di carattere più tecnologico e legata al fatto che la generazione, il processo di modulazione e di demodulazione è molto più semplice per segnali RZ che per segnali NRZ. Allo stato attuale specialmente per sistemi singolo canale a 40 Gb/s si pensa quasi esclusivamente ad una trasmissione di tipo RZ.

3.1 Sistemi DWDM

L'acronimo DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) indica la tecnica di modulazione che permette di trasmettere contemporaneamente su una singola fibra ottica una molteplicità di segnali generati da sorgenti laser diverse, accordate su differenti lunghezze d'onda solitamente indicate con " λ ". E' importante chiarire che concettualmente non vi è alcuna differenza tra la modulazione in frequenza (nota con l'acronimo FDM) usata nei sistemi elettrici di comunicazione e la WDM; si

preferisce usare il termine “wavelength” al posto di “frequency” solo per tradizioni culturali associate al mondo dell’ottica. La lettera “D” davanti alla sequenza “WDM” sta ad indicare che la differenza tra le lunghezze d’onda di canali adiacenti è inferiore ad 1nm (10⁻⁹m) e quindi $\Delta f \approx 100\text{GHz}$ cioè la multiplexazione è di tipo “denso”. Per i sistemi DWDM si fa riferimento a sistemi operanti in terza finestra (1500 nm). Nella figura seguente è riportato lo schema di principio di un generico collegamento DWDM:



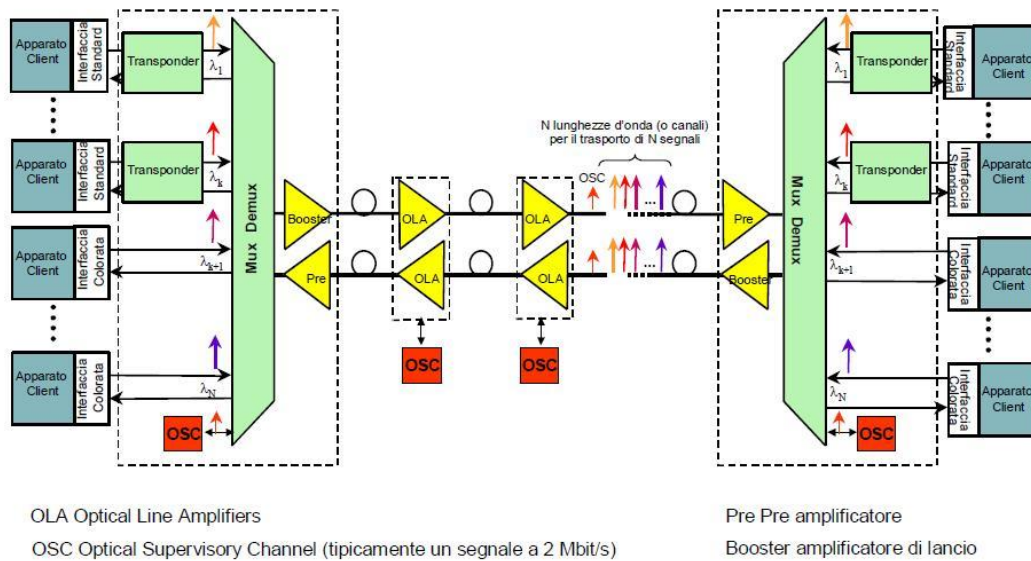
I sistemi realizzati con questo schema sono detti monodirezionali in quanto i segnali che viaggiano lungo ciascuna delle due fibre ottiche che compongono il collegamento si propagano in un solo verso (nella figura il verso è da sinistra a destra; in tale figura, inoltre, il segnale lo si è rappresentato schematicamente con il suo spettro in frequenza). In realtà di recente si sono messi appunto dei sistemi DWDM, detti bidirezionali, in cui su ciascuna delle due fibre che compongono il collegamento è possibile la propagazione di segnali in versi opposti potendo così realizzare collegamenti bidirezionali su una singola fibra. Tuttavia questi sistemi sono stati impiegati solo in alcuni casi particolari e pertanto nel seguito si farà riferimento ai soli sistemi monodirezionali. Guardando la figura 6.3 si osserva la presenza di un “accoppiatore passivo” N:1 che ha la funzione di accoppiare (cioè convogliare) gli N segnali generati dai LASER verso un’unica fibra di uscita; naturalmente per consentire agli apparati in ricezione di filtrare in frequenza e quindi separare i segnali, le lunghezze d’onda degli N LASER devono necessariamente essere diverse. Per compensare l’attenuazione introdotta dall’accoppiatore e consentire di lanciare in fibra una potenza sufficientemente elevata si introduce un amplificatore di lancio (o di potenza) detto booster. All’uscita del booster il segnale è

predisposto per essere lanciato in fibra. Naturalmente se la distanza tra i terminali dovesse essere troppo elevata si può prevedere l'inserimento di uno o più amplificatori ottici di linea detti OLA (Optical Line Amplifier) che hanno il compito di recuperare l'attenuazione introdotta dalla tratta di fibra che li precede; nel seguito si vedrà come il numero di OLA che è possibile inserire nel collegamento è limitato da diversi fattori. Al termine del collegamento, prima di passare attraverso lo splitter passivo, il segnale multiplato subisce un'amplificazione da parte del PRE (PREamplificatore ottico); questa amplificazione ha lo scopo di riportare il livello dei segnali a valori tali per cui la divisione operata dallo splitter e il successivo filtraggio operato dai filtri ottici non portino la potenza di ciascun segnale sotto la sensibilità minima dei ricevitori posti alla destra dei filtri. Qualora l'attenuazione introdotta dagli accoppiatori gli splitter e i filtri (detta anche perdita di inserzione) sia molto bassa (componenti di alta qualità) risulta possibile l'uso della moltiplicazione di lunghezza d'onda senza amplificazione ottica in applicazioni di trasporto in ambito locale o metropolitano dove le distanze da superare sono dell'ordine della decina di chilometri. Al DWDM i comitati di normalizzazione in seno all'ITU hanno riservato, per il momento, una finestra spettrale che si estende tra 192 e 196 THz, con una canalizzazione, che prevede una distanza tra le frequenze vettrici pari a 100 GHz (0.8 nm), come previsto in seno alla Raccomandazione ITU-T (G.692). Rispettando tale canalizzazione viene assicurata la compatibilità tra i sistemi di diversi costruttori. Generalmente un sistema DWDM, utilizza due fibre diverse per le due direzioni di trasmissione, anche se è possibile utilizzarne una sola, a patto di sacrificare parte della banda utile per interporre una banda di guardia tra i segnali che si propagano in direzioni opposte, e di separare le due direzioni ad ogni punto di amplificazione. Sistemi DWDM: sistemi aperti, sistemi integrati, sistemi misti Si è detto che il sistema DWDM moltiplica N canali ottici, ognuno dei quali può ospitare un segnale client generato da un corrispondente apparato connesso al sistema di linea DWDM; in base alla modalità di connessione con questi apparati i sistemi DWDM sono classificati in sistemi aperti, sistemi integrati e sistemi misti. I sistemi aperti consentono di trasportare una classe di segnali client molto estesa; vale a dire che i segnali client che possono essere convogliati sullo stesso sistema DWDM possono essere anche molto diversi in termini di caratteristiche quali: la struttura di trama, il

formato di modulazione e la velocità di cifra. Ciò è reso possibile dall'utilizzo di tecniche di conversione della lunghezza d'onda mediante dispositivi chiamati trasponder o adattatori di lunghezza d'onda (wavelength adapter): questi consentono di adattare i segnali ottici generati dagli apparati client al trasporto con sistemi DWDM. Questo adattamento consiste nella generazione di un nuovo segnale ottico con lo stesso contenuto informativo del segnale client ma con livelli di potenza e lunghezza d'onda conformi alle specifiche del sistema di linea DWDM.

I sistemi integrati, invece, sono basati su una filosofia opposta; essi infatti formano un tutt'uno con i sistemi client. In questi sistemi, sono le stesse interfacce ottiche dei terminali client a garantire il corretto formato del segnale in ingresso al sistema DWDM sia in termini di potenza che di lunghezza d'onda(ad esempio i terminali ADM-16 SDH). Per tale ragione questi sistemi sono spesso indicati anche come sistemi con interfacce colorate. I sistemi misti, infine, prevedono sia la presenza di trasponder che di interfacce colorate.

Si riporta lo schema semplificato di un sistema misto. Sempre con riferimento alla figura 6.4 si osservi che i blocchi Mux Demux realizzano sia l'accoppiamento con la fibra (Mux) sia la separazione dei segnali ottici (Demux). Quindi ciascuno di questi due blocchi sarà composto da un accoppiatore passivo, uno splitter, un banco di filtri ottici, un booster ed un preamplificatore.



3.2 Sistemi in Fibra PDH e SDH

A partire dagli anni '70 c'è stata una ampia diffusione dei sistemi di trasmissione in fibra ottica e furono creati degli standard per tali sistemi che definivano innanzitutto il tipo di multiplexazione che veniva utilizzata. Inizialmente furono introdotti i sistemi Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH), che alla fine degli anni '90 furono sostituiti dai sistemi Synchronous Digital Hierarchy (SDH) che permettevano una migliore affidabilità, la maneggevolezza dei flussi numerici e una

più alta capacità. La situazione attuale è che ormai sulla rete dorsali i sistemi sono tipicamente SDH con frequenze di cifra a 640 Mb/s e 2.5 Gb/s ma sono sempre più presenti anche i sistemi a 10 Gb/s e i sistemi WDM (nx2.5 Gb/s e mx10 Gb/s).

La tecnologia SDH è una tecnologia molto affidabile ma anche molto costosa che per alcune trasmissioni può risultare anche troppo onerosa. Specialmente per il protocollo IP una tecnologia più semplice dell'SDH sarebbe sufficiente e per questo è stata introdotta una tecnologia di trasmissione asincrona denominata Gigabit Ethernet (GBE), compatibile con le reti ETHERNET.

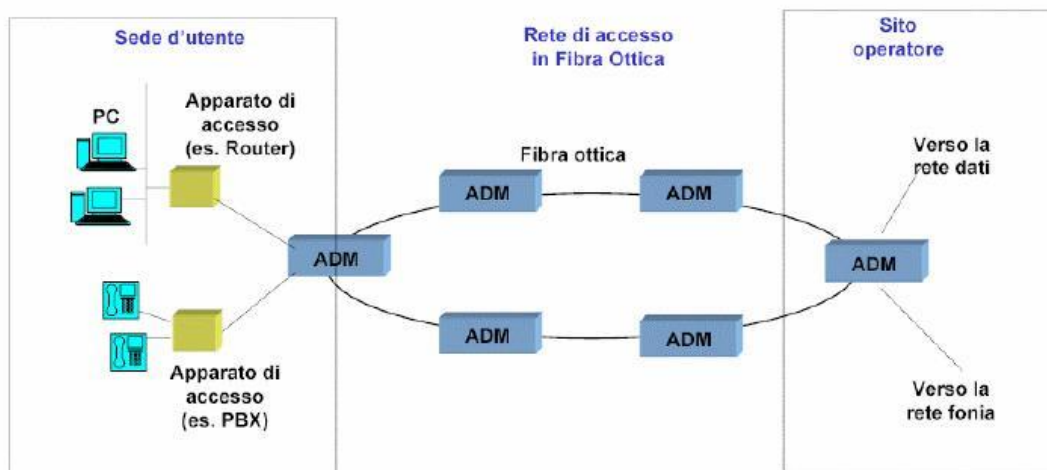
La multiplexazione numerica permette a più flussi numerici di essere accorpati a divisione di tempo in un unico flusso ad alta velocità. Ogni flusso viene detto tributario

I sistemi si suddividono sostanzialmente in sistemi sincroni e plesiocroni: nei sistemi sincroni i cronosegnali dei tributari hanno la stessa frequenza istantanea e quindi una differenza di fase costante; nei sistemi plesiocroni i cronosegnali hanno la stessa frequenza nominale e i possibili scostamenti del valore istantaneo sono contenuti in un intervallo di tolleranza prefissato.

3.2.1 PDH e SDH

I sistemi PDH, presentavano però delle difficoltà e prime tra tutte la necessità della demultiplazione completa del segnale di linea fino al livello gerarchico del tributario che si vuole estrarre. Inoltre era presente una scarsa disponibilità nella trama per scopi di esercizio e manutenzione. Inoltre per la gestione del sistema (reinstradamento dei flussi e manutenzione della rete) è necessario un approccio manuale. Nella versione europea, le frequenze di cifra della gerarchia PDH sono i valori 2.048 Mbit/s, 8.448 Mbit/s, 34.368 Mbit/s, 139.264 Mbit/s e 564.992 Mbit/s.

La tecnica SDH superò i principali limiti del PDH e presenta numerosi vantaggi e funzioni accessorie. Soprattutto, i sistemi SDH su fibra ottica sono compatibili con le tecniche DWDM e mettono a disposizione una capacità trasmissiva enorme arrivando fino ai 10 Gb/s . Gli apparati fondamentali dell'SDH sono gli ADM che permettono l'inserimento e l'estrazione di flussi tributari all'interno di un nodo e il Digital Cross Connect, denominato anche Ripartitore Elettronico Digitale (RED) che permette la permutazione dei flussi all'interno di un nodo secondo una mappa prestabilita, modificabile via software.



La trama SDH è in grado di trasportare ogni tipo di segnale, da quello telefonico a quello basato sulla commutazione ATM e IP, pertanto oggi la maggior parte dei sistemi in fibra ottica sono di tipo SDH. Diversi sono i vantaggi offerti dalle tecniche SDH, primi tra tutti la flessibilità di gestione dei flussi trasmessivi, la protezione automatica del traffico e presenta inoltre delle funzioni evolute per l'esercizio e la

manutenzione. In particolare l'SDH permette l'accesso diretto ai tributari (cosa non permessa dalle tecniche PDH). In questo modo la rete è più flessibile ed efficiente in quanto tutti gli apparati di rete sono in grado di eseguire operazioni di ADD-DROP distribuite a 2, 34 e 140 Mb/s.

La tecnologia SDH ha come principale vincolo il fatto di essere una tecnologia di multiplexazione TDM (Time Division Multiplexing) con trama sincrona e quindi di fornire ad ognuno degli utenti una capacità costante nel tempo che non può essere utilizzata da nessun altro utente anche se temporaneamente libera. Le risorse trasmissive vengono quindi dedicate ad ogni utente nel tratto di accesso fino al primo nodo di commutazione (centrale telefonica, router, switch ATM, ecc.). Se da un lato questo garantisce al cliente la velocità richiesta, l'utilizzo della banda complessiva disponibile risulta inefficiente in quanto, pur consentendo a più utenti la condivisione della banda totale disponibile su un anello, non è possibile comunque riutilizzare la banda dedicata ad un utente, ma momentaneamente non usata.

La minore efficienza e i costi piuttosto elevati associati agli apparati SDH, fanno di questo tipo di reti di accesso una soluzione solitamente dedicata a clientela di tipo business. Per la realizzazione di reti con maggior numero di accessi per anello (ad esempio per l'utenza residenziale) si tende a preferire tecnologie che consentono la multiplexazione statistica delle risorse come ad esempio Gigabit Ethernet. Per quanto riguarda la possibilità di trasporto di vari tipi di dati, la tecnologia SDH nasce per il trasporto della fonia ed è quindi in grado di trasportare i due tipi di traffico su flussi separati con la massima affidabilità possibile, anche se senza possibilità di condivisione della banda fra i due tipi di traffico. L'SDH è una tecnologia matura. Nonostante il trend decrescente dei prezzi, i limiti della tecnologia per quanto riguarda le reti di accesso fanno pensare che, anche nel futuro, il suo utilizzo al di fuori dei backbone e delle reti di distribuzione cittadina, si limiterà alla realizzazione di collegamenti per l'utenza business, realizzati sia su anelli di accesso, sia su collegamenti punto-punto.

Il fattore chiave per la diffusione della tecnologia come accesso sta nella possibile diminuzione dei prezzi degli apparati di rete all'aumentare della diffusione e alla diminuzione delle prestazioni richieste. I prezzi attuali degli apparati risentono infatti della necessità per apparati di rete di essere notevolmente affidabili, robusti e

gestibili. Una sufficiente richiesta potrebbe permettere alla tecnologia di diventare competitiva a livello di prezzo con la sua principale concorrente (Gigabit Ethernet) per quanto riguarda le architetture su fibra.

3.2.2 Gigabit Ethernet (GbE)

Una diffusa idea su una trasmissione alternativa all'SDH è quella di una tecnica asincrona del tipo Gigabit Ethernet (GbE), che utilizza un metodo di trasmissione basato sul fatto che ogni sequenza di 8 bit di informazione sono incapsulati in un blocco di dieci bit di trasmissione. Attualmente i sistemi Gigabit Ethernet lavorano a 1.25 Gbit/s, ma saranno presto disponibili sistemi a 5 e a 10 Gbit/s. La GbE mostra moltissimi vantaggi e non ultimo il fatto che è una evoluzione della trasmissione ETHERNET che è la più diffusa nelle reti LAN. A questo si aggiunge il fatto che il costo della tecnologia GbE è molto più economico di quella SDH e tanto per riportare un esempio le porte di accesso IP con tecnica GbE hanno un costo fino a 5 volte più basso della corrispondente porta SDH. Gli scettici verso questa tecnica sostengono che la GbE presenta un altissimo overhead rispetto all'SDH (28%) [11], ma questa considerazione va analizzata sotto un altro punto di vista. E' vero che, dovuto al formato 8B/10B, l'informazione trasmessa è bassa rispetto al bit rate del segnale e certamente se un segnale GbE dovesse essere incapsulato in un formato SDH vi sarebbe un'alta inefficienza, ma poiché lo scopo del GbE è proprio quello di evitare l'SDH, il problema dell'overhead può essere visto in maniera inversa e cioè che per trasmettere una capacità di 900 Mbit/s occorre un canale a 1.25 Gbit/s. Dal punto di vista della banda della fibra e dell'elettronica di trasmissione e ricezione questo incremento di banda non porta ad alcun aumento dei costi. Il discorso potrebbe essere leggermente diverso per la trasmissione a 10 Gbit/s, poiché il sistema potrebbe operare in critiche condizioni di propagazione e di elaborazione elettronica. Possiamo quindi concludere che per trasmissioni con capacità inferiore ai 2.5 Gbit/s la GbE è certamente un'ottima soluzione per l'IP over WDM.

Lo standard Gigabit Ethernet (standard IEEE 802.3z), rappresenta un'evoluzione dello standard dominante nella tecnologia delle LAN (Local Area Network) ovvero

dello standard Ethernet. La tecnologia permette di trasmettere trame ethernet su portanti in fibra e in doppino con una velocità di 1 Gb/s. Mentre la trasmissione su doppino richiede doppi di alta qualità (cat.5) e di lunghezza limitatissima (35 metri, 100 con l'utilizzo di 4 coppie simmetriche) la trasmissione su fibra permette di coprire distanze fino a decine di km ed è stata quindi gradualmente introdotta non solo per la realizzazioni di reti locali e di campus, ma anche per la realizzazione di anelli di accesso a reti geografiche. Data la compatibilità dello standard con gli standard Ethernet (a 10 Mb/s) e Fast Ethernet (100 Mb/s) le tecnologie GbE sono relativamente poco costose, oltre ad essere facilmente in grado di utilizzare le tecnologie Ethernet standard per l'accesso ai sistemi di utente con costi di apparecchiature terminali che allo stato attuale sono molto più bassi dei sistemi ottici tradizionali (SDH).

Anche nel caso della tecnologia GbE, la topologia di rete è spesso ad anello. Lo schema di riferimento della tecnologia GbE su topologia di rete ad anello è analogo a quello della rete SDH, con la sostituzione degli apparati di anello con switch GbE. In questa configurazione, la portante ottica da 1 Gb/s realizzata sull'anello in fibra è condivisa tra tutti gli utenti degli apparati. Lo switch

installato a livello di palazzo (o di gruppo di abitazioni) viene utilizzato per separare i collegamenti verso i vari utenti utilizzando: o fibra (per collegamenti Ethernet a 10, 100 o 1000 Mb/s); o cavi in doppino di alta qualità (per collegamenti Ethernet a 10 o 100 Mb/s); o il tratto terminale della esistente rete in rame (con tecnologia VDSL);

o tramite accesso radio con tecnologie WLAN. Dato che l'architettura Ethernet fornisce alcune prestazioni di commutazione, il collegamento sull'anello è in realtà di tipo any-to-any, e il traffico interno all'anello (vale a dire che origina e termina su utenti direttamente connessi all'anello) non ha quindi necessità di risalire fino ad un nodo di rete. Le attuali realizzazioni di accesso tramite GbE utilizzano solitamente una portante ottica a 1 Gb/s sull'anello e accessi per l'utente a 10 Mb/s (100 per utenze di tipo business).

Si noti che a differenza del caso SDH, la velocità disponibile all'utente non corrisponde a risorse dedicate e quindi ad una prestazione garantita, ma piuttosto alla velocità massima di accesso. Come tutti i sistemi che utilizzano la moltiplicazione

statistica, i sistemi GbE permettono la condivisione di tutta la banda disponibile tra tutti gli utenti. La trasmissione di ogni pacchetto, viene quindi effettuata sempre utilizzando tutta la banda disponibile. Questo tipo di tecnologie (che comprende ad esempio anche i sistemi di commutazione IP) permette un'elevata efficienza nell'utilizzo della banda disponibile, anche se può creare problemi nella gestione di servizi con qualità garantita (in particolare servizi di fonia).

La tecnologia GbE, consente quindi di fornire servizi ad alta velocità con garanzie di banda ridotte ad un numero elevato di clienti sullo stesso anello, permettendo una condivisione molto efficiente delle risorse disponibili. È quindi particolarmente adatta ad un cablaggio capillare di utenze residenziali e piccole utenze business. Gli apparati

GbE sono di costo ridotto se confrontati con i corrispondenti apparati SDH, e anche i sistemi di terminazione sono di costo molto basso essendo basati su tecnologia Ethernet a basso costo ed elevata diffusione. Per il trasporto integrato della fonia, indispensabile per fornire il servizio a utenze del tipo citato, è solitamente utilizzata l'integrazione del traffico di fonia su IP (VoIP Voice over IP) che richiede elevate performance di rete, e l'utilizzo di Gateway appositi all'interno della rete di trasporto per il collegamento con le reti tradizionali di telefonia pubblica (PSTN Public Switched Telephonic Network), nonché di apparati di utente in grado di fornire interfacce standard per il collegamento di telefoni o centralini analogici o ISDN.

Questi sistemi sono attrattivi quindi perché si basano su uno standard stabile e largamente diffuso sulle reti LAN; l'utilizzo dello stesso protocollo rende naturale l'interoperabilità tra le reti LAN e la rete di accesso. Ethernet è un sistema molto efficace per la trasmissione dei dati basati su protocollo IP.

L'attesa crescita di questo tipo di traffico rende questa tecnica di accesso particolarmente appetibile per il prossimo futuro. La tecnologia GbE è uno standard ancora in fase di evoluzione. Da un punto di vista di costi, ha comunque alcuni vantaggi che derivano dall'essere l'evoluzione di una tecnologia molto nota ed estremamente diffusa, e di poter sfruttare l'omogeneità con altre tecnologie simili (ad esempio le tecnologie WLAN 802.11x che derivano dallo stesso standard IEEE). La possibilità di ulteriore evoluzione è testimoniata da un lato dalla discesa dei prezzi

degli apparati relativi a questa tecnologia, e dall'altro dalla possibilità di utilizzare a breve il successivo standard che dovrebbe aumentare la velocità della portante trasmissiva a 10 Gb/s.

L'aumento della capacità trasmissiva sugli anelli può anche essere effettuato utilizzando tecniche di moltiplicazione a divisione di lunghezza d'onda (DWDM) sull'anello di accesso. Nel futuro, anche grazie all'evoluzione dei servizi basati su IP, ed in particolare al sempre migliore supporto alle applicazioni real time (ad esempio audio e videoconferenza) l'utilizzo di tecnologie della famiglia Ethernet permetterà una sempre maggiore efficienza nell'utilizzo della banda a disposizione

4 LiFi

4.1 Visual Light Communication

Le reti wireless come le conosciamo oggi hanno permesso l'interconnessione di più dispositivi, perlopiù limitati ad un ambiente “geograficamente ristretto” come la casa, l'ufficio ,etc. Con la grande diffusione della tecnologia WI-FI si è avvertita la “necessità” di dover collegare sempre più dispositivi, tablet, smartphone, smartwatch, elettrodomestici, e apparecchi di varia natura, ma in questo modo si è andati incontro ad uno dei limiti principali di tale infrastruttura: la sovrapposizione di frequenze sia con altri dispositivi wireless, sia con elettrodomestici, monitor per la videosorveglianza dei bimbi, e altri dispositivi che interferiscono con le bande del wi-fi

Esiste una implementazione alternativa del concetto di connessione senza fili basata su comunicazione e trasferimento dei dati tramite luce artificiale nel range visibile, chiamata LiFi (Light Fidelity) grazie allo sfruttamento di sorgenti di luce a diodo (LED, light-emitting diode), tecnologia meglio nota come Comunicazioni Ottiche con Luce Visibile (Visible Light Communication, VLC).Sul modello di comunicazione ottica della fibra, si sono sviluppate tecnologie sempre più innovative. Utilizzando come mezzo trasmissivo l'aria , si è pensato di mettere in collegamento un emettitore di impulsi nelle frequenze del visibile (led) e un ricevitore fotoelettrico.

L'idea geniale alla base della VLC è quella di associare all'illuminazione della sorgente emettitrice del segnale, l'invio delle informazioni: l'emettitore viene acceso e spento ad una velocità che l'occhio umano non contraddistingue (sembrerà sempre acceso). Il led ha portato il grande vantaggio di essere un emettitore che ben si presta all'utilizzo di trasmettitore, poiché può essere facilmente modulato in modo da codificare segnali binari.

Gli utilizzi della luce visibile come mezzo di trasmissione, naturalmente hanno dei pro e dei contro.

Tra i pro vi è sicuramente che a livello tecnologico l'applicazione del VLC è poco costosa in quanto i LED possono essere facilmente “adattati” con l'aggiunta di un chip; il VLC è poco dannoso in quanto , i led operano a frequenze alte ma il tipo di

radiazione (luce visibile) non è dannosa (anche se può diventarlo in particolari condizioni); questo tipo di applicazione risulta avere un'elevata sicurezza alle intrusioni ; inoltre tra i vantaggi di questa tecnologia vi sono da segnalare le innumerevoli applicazioni : le automobili che comunicano con le insegne luminose, con i segnali, con la pubblica illuminazione per la gestione del traffico, della sicurezza e anche della circolazione pedonale; gli elettrodomestici che comunicano tra loro o con una centralina di intelligenza artificiale; ma anche applicazioni scientifiche come l'invio di dati nelle profondità marine, etc etc.

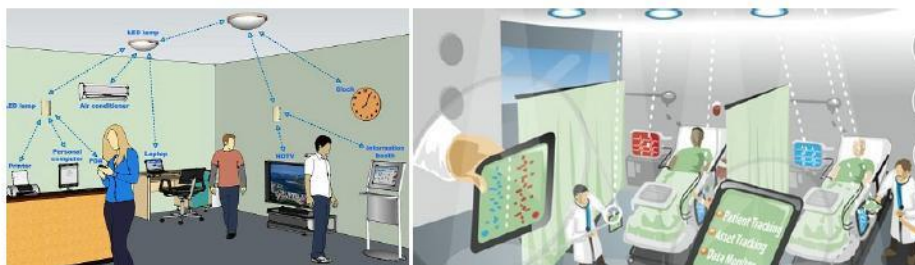
Il concetto di comunicazione tramite l'utilizzo della tecnologia VLC è già in fase di standardizzazione dal 2011 e sono state definite le caratteristiche salienti: bidirezionalità, bit rate di almeno 10Mb/s, facilità di interconnessione di dispositivi e naturalmente l'utilizzo di luci ambientali artificiali come sistema ottico di trasmissione dati. Un aspetto da non sottovalutare è la sicurezza "strutturale" del segnale: non essendo a rischio di interferenze , potrebbe essere usato tranquillamente negli ospedali per connettere ad i dispositivi diagnostici e negli aerei ad esempio senza interferire minimamente con la strumentazione. Ogni ambiente chiuso in cui la radiazione elettromagnetica deve essere limitata per questioni di salute delle persone stesse, sono ambienti perfetti per sfruttare le potenzialità dei sistemi VLC. Le comunicazioni ottiche con luce visibile sono adatte anche per applicazioni di tipo IPS (Indoor Positioning System, praticamente un sistema di guida GPS in ambienti chiusi), per tracciare e trovare la posizione di un soggetto di interesse (come la marca preferita di cereali in un super-mercato, il quadro più importante di un autore in un grande museo etc,etc. La telecomunicazione ottica senza fili garantisce altri vantaggi rispetto al Wi-Fi. Prima di tutto, una rete Li-Fi non richiede nessun nuovo impianto né l'installazione di antenne o ripetitori: si possono sfruttare reti di illuminazione LED già esistenti (le luci di casa, ad esempio, o l'impianto di illuminazione pubblica in strada) accoppiate con normali telecamere (ad esempio le webcam dei nostri PC o le telecamere dei nostri cellulari).

Le varie fonti luminose – solitamente composte da più di un LED – potrebbero comunicare contemporaneamente con più dispositivi, inviando segnali differenti a ognuno di essi: in questo modo lo spettro delle frequenze potrebbe essere utilizzato

in maniera più efficiente e senza che si creino le interferenze tipiche delle altre onde elettromagnetiche.

L'adozione su larga scala della tecnologia Li-Fi, inoltre, potrebbe dare un ulteriore impulso all'Internet delle cose. Gli elettrodomestici intelligenti (smart) presenti nelle nostre case potrebbero sfruttare le telecomunicazioni ottiche wireless anziché il Wi-Fi per comunicare tra di loro, rendendo il tutto più semplice, più sicuro e senza rischiare la saturazione della capacità di trasmissione del Wi-Fi. Secondo molti analisti di mercato, il Li-Fi rappresenta l'unica opzione percorribile per permettere all'Internet delle cose e al settore dei Big Data di continuare a crescere. Le attuali tecnologie di comunicazione senza fili, infatti, non riuscirebbero a supportare a lungo la richiesta di banda necessaria al trasferimento dei dati delle decine di milioni (miliardi, in previsione) di oggetti smart connessi alla Rete.

A far pendere l'ago della bilancia verso il Li-Fi piuttosto che verso altre tecnologie concorrenti non è soltanto la velocità di connessione o l'ampiezza della banda di comunicazione che questa tecnologia garantisce. La banda delle frequenze si estende da 428 THz (700 nm) a 750 THz (400nm) e realizzare una rete di comunicazione basata sulle lampadine LED non richiederebbe, grossi investimenti di partenza. Per creare dei trasmettitori Li-Fi basterebbe aggiungere un piccolo microchip alle lampadine LED già in uso in tutto il mondo. Tenendo conto che, ad oggi, globalmente sono installate circa 14 miliardi di lampadine, si comprendono immediatamente i grandi vantaggi pratici che una tecnologia basata sul Li-Fi potrebbe portare al mondo dell'IoT.



Un sistema Li-Fi è stato testato con successo a Tallin (capitale dell'Estonia), all'interno di un ambiente produttivo/industriale. A partire dalla prima metà del 2015

Velmenni, startup estone attiva nel settore dell'hi-tech, ha utilizzato un impianto Li-Fi per connettere a Internet computer, smartphone e altri dispositivi di rete.

E i risultati, stando a quanto dichiarato dal CEO di Velmenni Deepak Solanki, sono molto incoraggianti: la rete Li-Fi estone ha raggiunto una velocità di connessione di 224 gigabit al secondo (28 gigabyte al secondo), circa 100 volte più veloce della migliore tecnologia Wi-Fi oggi disponibile sul mercato.

Tanto per dare una misura della velocità, con una connessione del genere sarebbe possibile trasferire 18 film (o file) da 1,5 gigabyte ognuno in appena un secondo.

Per raggiungere questo risultato, la startup estone ha utilizzato delle speciali lampadine in grado di "flashare" con una frequenza variabile tra i 400 e gli 800 terahertz. In questo modo l'occhio umano non percepisce l'interruzione del flusso di luce, mentre i ricevitori della rete Li-Fi, molto più sensibili, sono in grado di captare le variazioni luminose e decifrare i dati in entrata.

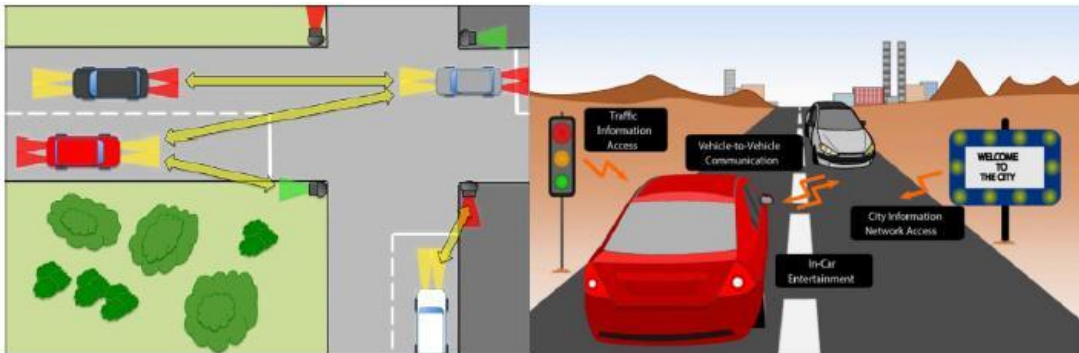
La rete in una stanza a differenza di quanto accade con il segnale delle reti Wi-Fi, una rete ottica senza fili sarebbe completamente schermata da un qualsiasi ostacolo opaco alla luce (ad esempio dai muri di una stanza o dalle tapparelle di una finestra). Questo dà la possibilità di sigillare la rete così facilmente da permettere di realizzare in maniera estremamente semplice LAN sicure e inaccessibili a chiunque non sia in grado di vedere direttamente gli impulsi luminosi utilizzati per la trasmissione dei dati.

La città di Dubai, per esempio, ha annunciato che entro il - sarà tutta connessa in li-fi. A Catania, Enel ha installato all'interno del suo nuovo Innovation Hub&Lab - punti luce li-fi, progettati e installati dalla startup italiana To Be, che consentono l'accesso a contenuti web attraverso una app geolocalizzata.

Interessanti anche gli sbocchi che il settore può creare nel campo della city smart: semafori che comunicano con i veicoli lifi, e gli stessi veicoli che comunicano tra di loro e con gli impianti luminosi stradali (insegne, semafori, mezzi di soccorso).

Una quindicina di città francesi e le autorità belghe della regione Vallonia hanno in programma di attivare reti di questo tipo nei loro comprensori. Un'attenzione che ha stimolato a realizzare soluzioni pronte per il mercato grandi gruppi, come Signify (ex Philips Lighting), Osram, Edf, Engie, Orange, per citarne alcuni, oppure aziende

specializzate come Oledcomm, Velmenni e PureLiFi, una spinoff creata dallo stesso Haas.



Secondo una recente indagine condotta dall'azienda francese di analisi di mercato Yole Développement il mercato di questo settore, ancora in fasce, giungerà a maturazione a partire dal - e, crescendo a un tasso del 53 % annuo, dovrebbe

giungere nel - a un valore di 2.7 miliardi di dollari. I suoi vantaggi consistono soprattutto nel fatto che il segnale li-fi resta confinato a livello spaziale. Non può, cioè, penetrare attraverso muri o pareti, e questo si traduce in una maggiore densità di dati, cioè in bit al secondo trasmessi per metro quadro, e in una maggiore sicurezza, di diversi ordini di grandezza superiore rispetto al wireless tradizionale. Viene infatti virtualmente eliminato ogni rischio di cyberattacco del tipo "man in the middle", caratterizzato cioè dall'intromissione di qualcuno che altera o intercetta le comunicazioni via web tra due interlocutori. All'inizio il li-fi era ritenuto un sistema di trasmissione dati "a linea di vista", che cioè richiede un percorso in linea retta tra trasmettitore e ricevitore, senza la presenza di ostacoli.

Oggi però nuove soluzioni hanno consentito di superare il problema attraverso led usati come ripetitori di segnale, più o meno come avviene anche per il wireless. Inoltre, è possibile modulare l'emissione della luce su frequenze praticamente invisibili all'occhio umano, rendendo fattibile la trasmissione di dati anche di notte senza dover tenere le luci accese. La trasmissione dati attraverso le onde luminose è in rapida evoluzione. Al momento, per esempio, si lavora alla miniaturizzazione di emettitori e ricevitori di segnale per incorporarli in dispositivi mobili come smartphone e tablet. Il punto più aggiornato sugli sviluppi verrà fatto il 12 e 13

giugno a Parigi, al Salon Hoche, in occasione del Global LiFi Congress, organizzato sotto la supervisione di un comitato scientifico di cui fanno parte alcune tra le università e i centri di ricerca più impegnati nello sviluppo della tecnologia, con una forte maggioranza francese.

Il paese transalpino, come dimostra anche l'alto patronato all'evento concesso dal presidente Francese, punta alla leadership nel settore. I business più interessati all'impiego del li-fi sono soprattutto quelli dell'aerospaziale e della sanità, ambiti in cui i dispositivi di questo tipo consentono una trasmissione rapida di grandi quantità di dati senza produrre interferenze con i sistemi di bordo o con le apparecchiature medicali. Un progetto in ambito sanitario è in corso anche in Italia, finanziato in parte dalla regione Friuli Venezia Giulia.

Ad oggi, le VLC sono realizzate con tecnologia a semiconduttore inorganico, per via delle maggiori prestazioni in termini di velocità e resa (efficienza quantica, EQE) dei dispositivi. In particolare, i sistemi VLC hanno avuto un buon impatto sulla comunità scientifica e nell'industria grazie ai moderni LED bianchi a stato solido (LED-chip) utilizzabili come sorgenti di illuminazione a basso costo e, per quanto detto, come trasmettitore del data-link VLC (ne consegue, infatti, un impatto economico relativamente contenuto qualora si intenda trasformare un impianto di illuminazione in una VLC).

Essenzialmente, vengono utilizzate due tipologie di LED-chip. Il primo è un LED-chip, ricoperto da un fosforo che assorbe parte dei fotoni emessi nel blu e, per fluorescenza, ri-emette su un range di lunghezze d'onda più basse: la sovrapposizione delle emissioni crea l'impressione del bianco. La seconda tipologia sfrutta lo stesso principio di sovrapposizione del pixel degli schermi RGB (red, green, blue) LED-chip, sovrapposte nella giusta proporzione. Con questa seconda tipologia si riescono a raggiungere frequenze di modulazione superiori in quanto il fenomeno della fluorescenza è più lento dell'emissione diretta della giunzione a semiconduttore; inoltre, una sorgente RGB può essere modulata come 3 canali disgiunti in parallelo, sovrapponendo quindi alla modulazione del segnale anche una WDM (Wavelength Division Multiplexing), triplicando, potenzialmente, il data-rate [19]. Tuttavia, diventa anche più complicato e costoso il sistema di controllo della sorgente, per cui la velocità finale richiesta dal sistema diventa il vero

‘selettore’ del tipo di LED-chip da impiegare. Discorso affine per i ricevitori della VLC, dove si sfruttano foto-rivelatori già presenti sul mercato (ad esempio i sensori delle fotocamere degli smartphone) ma vengono studiate anche soluzioni specifiche.

Molto interessanti e con ampi margini di crescita e applicazione sono le comunicazioni VLC create utilizzando sia come trasmettitore che come ricevitore un dispositivo realizzato con materiali organici (small-molecules o polimeri), quali OLED (organic light-emitting diode) e OPD (organic photo-detector), rispettivamente questa implementazione viene detta OVLC (Organic Visible Light Communication).

Come la controparte a semiconduttore inorganico, anche i dispositivi organici, trasmettitori OLED e ricevitori OPD, sono basati, entrambi, su una struttura multi-strato, che comprende:

a) uno strato attivo, o in emissione, o in assorbimento di fotoni, fatto con materiali organici, siano essi small-molecules, o polimeri;

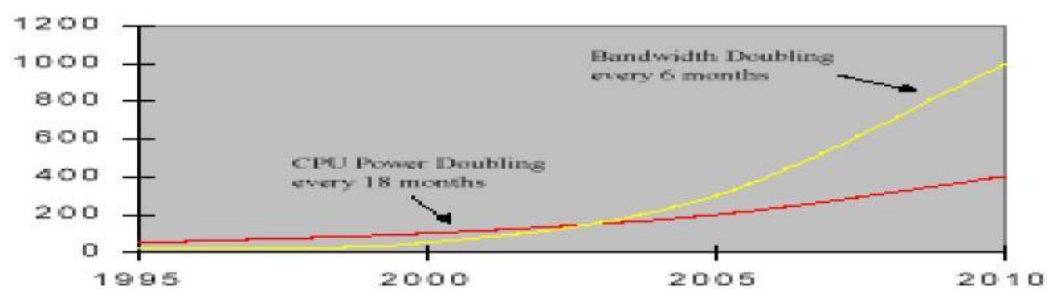
b) due elettrodi (anodo e catodo), di cui uno almeno realizzato sostituendo al metallo un ossido conduttivo trasparente (TCO, transparent conductive oxide) depositato su vetro o plastica flessibile (serve per avere almeno un lato del dispositivo attraversabile dalla radiazione luminosa, uscente o entrante che sia);

c) tra strato attivo ed elettrodi, due strati (uno per parte) funzionalizzati per aiutare selettivamente le cariche, lacune o elettroni (HTL o ETL, hole o electron transport layer, rispettivamente) nel passaggio dallo strato attivo all’elettrodo (estrazione, caso dell’OPD), o viceversa (iniezione, caso dell’OLED).

Lo stato attivo organico tra i due dispositivi fa realmente la differenza: Nel caso degli OLED lo strato attivo è realizzato con un materiale emettitore organico, avente i due livelli energetici HOMO (equivalente alla banda di valenza dei semiconduttori inorganici) e LUMO (banda di conduzione) tali che, attraverso l’iniezione di cariche dai due strati HTL e ETL (il dispositivo viene polarizzato agli elettrodi), gli elettroni in LUMO decadano ad occupare lo stato energetico della lacuna iniettata in controparte in HOMO, emettendo un fotone. A seconda della distanza energetica tra i due livelli, si possono avere emettitori organici praticamente in tutto il range del visibile.

Gli OLED hanno già una consolidata realtà a livello industriale grazie all'impiego nei tablet, smartphone e display in generale, pertanto il loro utilizzo in questo ambito (seppur con finalità diverse) non è nuovo. Rimangono ancora alcuni problemi legati alla durata della vita, all'intensità luminosa e alla degradazione del dispositivo, tuttavia il loro successo è fortemente sostenuto, grazie soprattutto ai bassi costi di fabbricazione ed alle maggiori dimensioni fabbricabili (in termini di area) rispetto alle controparti inorganiche.

Rimane tutt'oggi sia per la fibra ottica che per il lifi un unico grande ostacolo da superare: trovare la potenza di calcolo per gestire queste immense quantità di dati che si riusciranno a trasmettere. Per la prima volta dall'invenzione del PC, il collo di bottiglia non è più sulle connessioni ma è sulla potenza di calcolo dei singoli processori. Grazie a queste nuove tecnologie, e alle applicazioni sempre più prestanti, presto andranno ripensati i sistemi di gestione e di calcolo per poter sfruttare appieno tutta la banda trasportabile



Confronto fra crescita potenza cpu e crescita banda