



RETI WDM PON: PRINCIPALI SFIDE

Tommaso Muciaccia, Sandro Pileri



Megli ultimi anni sta crescendo l'interesse verso l'ottimizzazione delle prestazioni delle reti di accesso ottiche e verso la minimizzazione dei CapEx e degli OpEx per la realizzazione, l'esercizio e la manutenzione di queste nuove reti. Numerose soluzioni innovative sono in fase di sperimentazione; grande seguito, in particolare, stanno ricevendo le proposte di reti basate sulla WDM, pressoché universalmente riconosciuta come *enabling technology* per soddisfare i requisiti di banda delle reti d'accesso di domani.

1 Introduzione

Trend emergenti come l'*immersiva video* (video panoramico navigabile dall'utente a 360°), l'*ubiquitous cloud computing*, l'*E-learning* interattivo, i servizi avanzati di telemedicina e teleassistenza, nonché la domanda crescente di servizi multimediali come *video on demand*, *High Quality video-conference*, *next-generation 3D TV*, richiedono reti di accesso ottiche ad alta capacità (maggiore talvolta di 100 Mb/s), come mostrato in Figura 1a¹, e bassa latenza. Si pensi ad esempio che la fruizione di un singolo canale 4k UHDTV richiede almeno 15 Mb/s. Tali reti, per di più, dovranno essere costruite nel rispetto di vincoli economici ed ambientali più che mai sfidanti per essere "*faster, cheaper and greener*", ovvero più veloci, meno costose e più efficienti dal punto di vista energetico. [1] Un aspetto non trascurabile per gli operatori di TLC è quello di pensare alle reti di accesso del futuro ponendo molta attenzione a preservare gli investimenti fatti

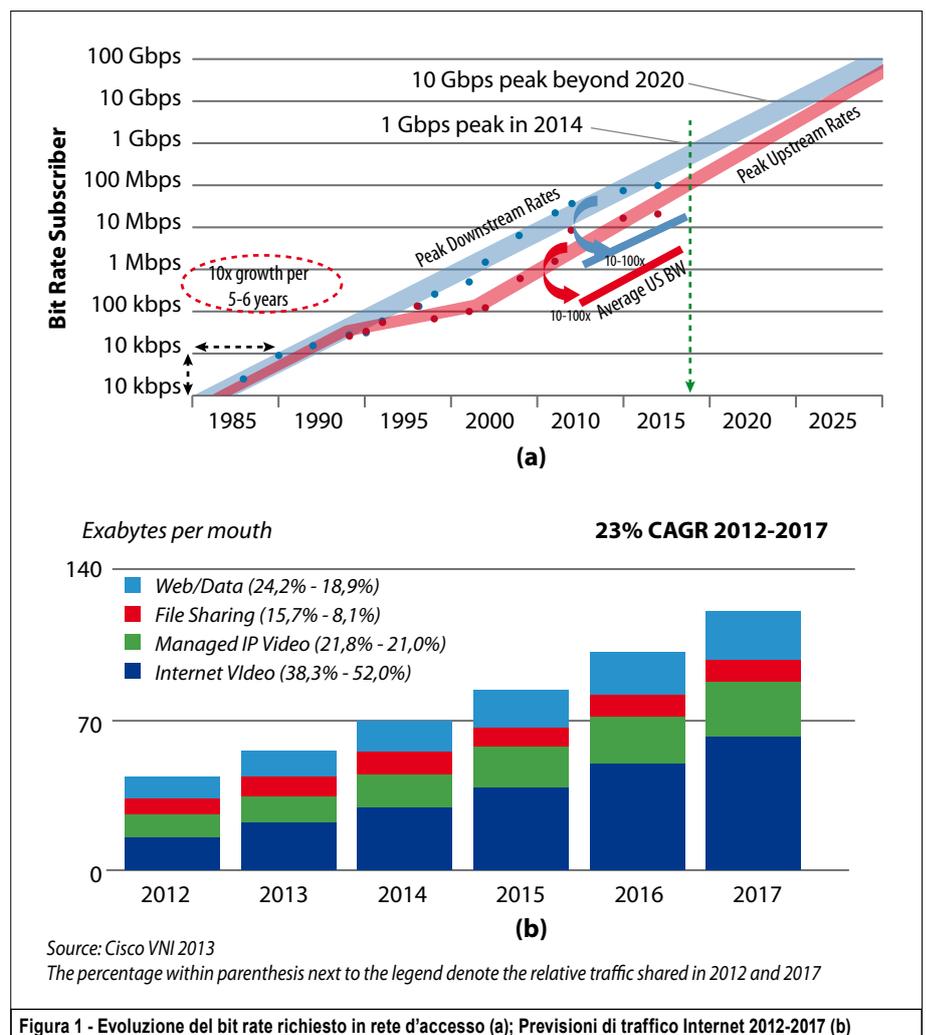


Figura 1 - Evoluzione del bit rate richiesto in rete d'accesso (a); Previsioni di traffico Internet 2012-2017 (b)

1 Xing-Zhi Qiu, "Burst-mode Receiver Technology for Short Synchronization", OFC 2013 Tutorial OW3G.4, 2013.

fino ad oggi o che sono stati previsti e approvati per la realizzazioni di soluzioni FTTx nel breve termine. Infatti, poiché la realizzazione delle reti di accesso ottiche (ODN) rappresenta il capitolo di spesa più rilevante (in una soluzione FTTH *greenfield* costituisce circa il 70-75% dell'investimento totale a fronte di circa il 20% per il costo degli apparati), è fondamentale prevedere, per quanto più è possibile, il riutilizzo della ODN per le reti di accesso del futuro.

Nella *roadmap* tracciata dal gruppo FSAN (*Full Service Access Network*), costituito dai principali operatori di TLC e fornitori di sistemi, per l'evoluzione delle reti di accesso fisse sono individuabili due fasi, denominate rispettivamente NG-PON1 ed NG-PON2. In entrambe le fasi viene posta l'attenzione sul riutilizzo della ODN esistente, in accordo con quanto suddetto. [2]

Fondamentalmente le soluzioni NG-PON1 ereditano parecchi aspetti tecnologici delle soluzioni PON precedenti. In particolare, FSAN ha individuato una soluzione denominata XG-PON (la 'X' indica il numero romano '10' perché il *bit rate* in *downstream* è di 10 Gb/s) già standardizzata dall'ITU-T nelle raccomandazioni G.987, G.987.1÷4. La XG-PON è stata definita per funzionare sulla stessa ODN utilizzata per la soluzione NGAN in tecnologia G-PON (soluzione oggi adottata da Telecom Italia per la FTTH), cioè la stessa architettura, lo stesso tipo di fibra ottica e gli stessi *splitter*; come la G-PON, anche la XG-PON impiega ancora la tecnica TDM per il *downstream* (DS) e quella TDMA per l'*upstream* (US), ma con capacità, gittata e numero di utenti superiori rispetto a G-PON: rispettivamente 10 Gb/s DS-2.5 Gb/s US

contro i 2.5 Gb/s DS - 1.25 Gb/s US, distanza superiore ai 20 km e fattore di *splitting* maggiore di 1:64 (1:128 o superiore).

Secondo quanto stabilito dal gruppo FSAN, con la NG-PON2 si intende iniziare una fase esplorativa sull'utilizzo di nuove soluzioni per aumentare ulteriormente la capacità delle reti di accesso e per risolvere le problematiche incontrate nella G-PON e nella XG-PON. Tale esplorazione ha condotto inevitabilmente a soluzioni che utilizzano la tecnologia WDM, con i necessari adattamenti per le reti PON, congiuntamente alla tecnologia TDM [3]. Con il presente articolo si vuole, invece, illustrare lo stato dell'arte e le principali sfide implementative per la realizzazione delle reti di accesso WDM PON, ovvero basate esclusivamente sulla tecnologia WDM.

2 Il perché della convergenza verso soluzioni basate su WDM

La tecnologia WDM non è di per sé una proposta innovativa essendo già da tempo impiegata per le reti trasmissive a lunga distanza (*backbone networks*) ed anche per le reti di aggregazione e trasporto metropolitane (*Metro-Access networks*), in sostituzione dei tradizionali sistemi SDH, aumentando la capacità dei collegamenti ed estendendo le tratte percorribili senza necessità di rigenerazione elettro-ottica 3R (*Reshaping, Retiming e Retransmitting*) del segnale. [4]

Costituisce tuttora un *hot topic* di ricerca e di sperimentazione, invece, l'applicazione esclusiva della WDM alle reti PON che presenta ancora questioni aperte sulle quali operatori telefonici,

fornitori e comunità scientifica si stanno confrontando con un ampio ventaglio di proposte e soluzioni, più o meno attuabili in un contesto operativo. Il principio di funzionamento di un *link WDM* è semplicissimo: a ciascun flusso di informazioni viene assegnata una lunghezza d'onda in modo da consentire il *multiplexing* di più segnali (più flussi di informazioni) su un unico mezzo trasmissivo. Banalizzando si potrebbe pensare ad un colore (una lunghezza d'onda) che identifichi ciascun segnale rendendolo, in qualsiasi punto del collegamento, distinguibile dagli altri e quindi selezionabile. Nel caso specifico di una rete WDM PON, una lunghezza d'onda, o più comunemente un paio di lunghezze d'onda (uno per il flusso in *downstream* e l'altro per il flusso in *upstream*), vengono assegnate a ciascun utente.

È come se a ciascuno di essi venisse fornito un collegamento dedicato in fibra ottica dandogli, invece, un segnale ottico ad una determinata lunghezza d'onda, diversa da quelle assegnate ad altri utenti. In altri termini, a ciascun utente viene fornito un *link* ottico punto-punto con il CO. Definita in questo semplice modo una rete WDM PON, appaiono immediatamente evidenti alcuni vantaggi che questa tipologia di rete d'accesso permette di ottenere:

- servizi simmetrici a banda dedicata;
- QoS garantita;
- *privacy/security* del collegamento.

È altrettanto intuibile che una soluzione di questo tipo si presterebbe a soddisfare i vincoli regolatori meglio delle tecnologie oggi in uso, semplificando notevolmente la gestione dell'*unbundling* verso gli OLO nell'ottica dell'*equivalence of*

input che costituisce un requisito indispensabile per le reti d'accesso. Sarebbe ipotizzabile, a tal proposito, l'assegnazione di un pacchetto di canali WDM, ovvero di lunghezze d'onda, all'operatore che intenda utilizzare determinati collegamenti della rete, consentendo il mantenimento di una completa indipendenza operativa con interfacce fisicamente separate.

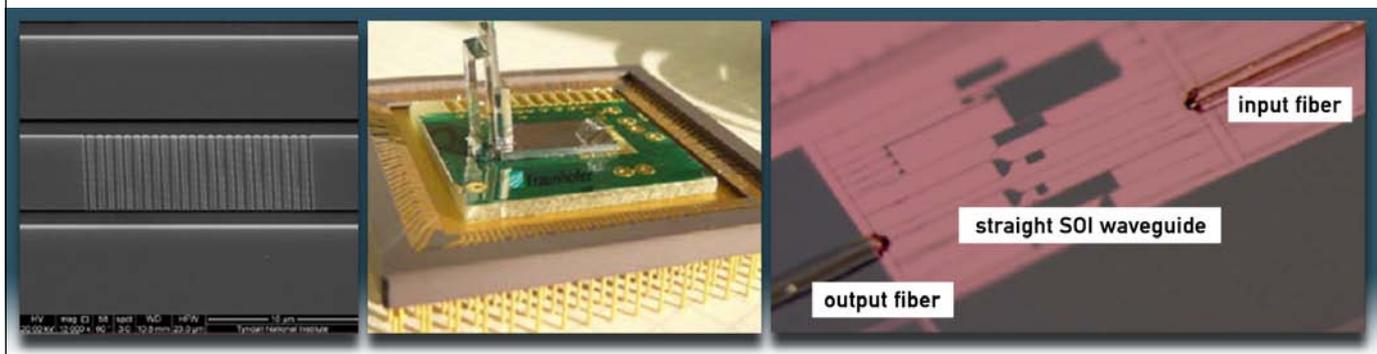
È lecito chiedersi le ragioni per cui il modello WDM PON, così semplice ed efficace, abbia incontrato sinora difficoltà nell'essere implementato dagli operatori di telecomunicazioni. La ragione principale risiede per lo più nei notevoli costi finora richiesti da componenti e sistemi ottici presenti in queste reti che necessitano di processi di fabbricazione più sofisticati e meno consolidati rispetto a quelli necessari per produrre dispositivi elettronici ed optoelettronici oggi impiegati nei sistemi in esercizio. La maturità tecnologica raggiunta negli ultimi anni dalla fotonica e, in particolare, i progressi compiuti dalla *Silicon Photonics* (la fotonica del silicio) renderanno, tuttavia, economicamente sempre più vantaggiosi la produzione e l'impiego su ampia scala di componenti ottici come sorgenti laser WDM, modulatori elettro-ottici ed altri dispositivi utilizzabili nelle reti WDM PON

che saranno descritti brevemente nel seguito. Tra i numerosi vantaggi della fotonica del silicio non è da sottovalutare la possibilità di realizzare circuiti fotonici integrati (PIC), come mostrato in Figura 2, che consentiranno l'integrazione monolitica, su un unico *chip*, di tutte le funzionalità necessarie ad un *transceiver* nell'OLT, ovvero trasmissione, ricezione, modulazione e demodulazione, con tecniche di fabbricazione supportate dagli standard dei processi CMOS (la tecnologia alla base della produzione dei diffusissimi circuiti elettronici integrati), garantendo un alto grado di affidabilità e costi relativamente bassi. L'approccio alternativo all'integrazione monolitica sarebbe quello dell'integrazione ibrida in cui le sezioni attive sono realizzate con le leghe III-V (p.e. GaAs e InP) e quelle passive in silicio ed ossido di silicio, traendo vantaggio dalle potenzialità di entrambe le classi di materiali. Entrambi gli approcci costruttivi presentano tutt'oggi sfide aperte per i costruttori, in particolare la realizzazione di sorgenti in silicio ed il *packaging*, l'allineamento dei diversi componenti e l'efficienza dell'accoppiamento di guide d'onda sub-micrometriche con le fibre ottiche. Tuttavia saranno proprio le particolari specifiche tecniche richieste dall'applicazione di que-

sti componenti nelle reti di accesso del futuro a medio-lungo termine a fungere da *driver* per definire la qualità delle prestazioni necessarie e, di conseguenza, la complessità ed il costo dei processi di fabbricazione dei dispositivi. [5]

Un aspetto da non sottovalutare nell'implementazione delle WDM PON sono i consumi energetici in centrale³, è fondamentale considerare che le soluzioni tradizionali TDM, ma anche la TWDM, necessitano di un numero inferiore di *transceiver* presso l'OLT e quindi sembrerebbero molto più vantaggiose rispetto a soluzioni WDM 'pure'. In un'ottica evolutiva a lungo termine, tuttavia, è opportuno effettuare il confronto considerando di fornire a ciascun utente un bit rate di almeno 1 Gb/s, e ciò attenua fortemente, fin quasi ad annullare, il vantaggio di soluzioni TDM PON rispetto a quelle WDM PON. Infatti, come per le reti PON attualmente implementate da Telecom Italia, una WDM PON resta rigorosamente passiva, ovvero non prevede la presenza di conversione elettro-ottica in alcun punto intermedio della ODN; per di più, in una WDM PON non è previsto l'utilizzo di uno *splitter* ottico passivo nel quale la potenza ottica relativa al segnale in *downstream* viene ripartita tra i diversi rami

Figura 2 - Esempio di circuito fotonico integrato in silicio²



² B. Charbonnier, Sylvie Menezo, P. O'Brien, Aurélien Lebreton, J. M. Fedeli, B. Ben Bakir, "Silicon Photonics for Next Generation FDM/FDMA PON", IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol. 4, 2012.

³ L'impatto delle reti di nuova generazione sull'ambiente è da tempo un imperativo indifferibile, non solo per limitare le emissioni di CO₂, ma anche per contenere gli OpEx, tenendo conto che l'energia elettrica consumata annualmente dagli incumbent è ingente (Telecom Italia è tra i primi utenti nazionali per consumo annuo di energia elettrica). [6]

di uscita relativi a ciascun utente, evitando quindi la conseguente inefficienza energetica (uno *splitter* 1:n ha una perdita di *splitting* pari a $3\log_2 n$ dB). Si deve inoltre considerare la penalità del budget di potenza per dispersione cromatica, che è tanto maggiore quanto più alta è la frequenza di cifra del segnale trasmesso sulla fibra e la distanza cliente-CO⁴. Ma la potenza di trasmissione dei segnali è solo uno degli aspetti che incidono sui consumi. Un ulteriore risparmio energetico complessivo sarà presumibilmente ottenibile considerando anche i dispositivi presenti nelle ONU di ciascun utente che stanno evolvendo secondo la filosofia del progetto di ricerca europeo C3PO (*Colourless and coolerless components for low power optical networks*). [7]

3 Multiplexing, modulazione e codifica

Le reti PON, com'è noto, sono reti con un'architettura ad albero P2MP in cui non è presente nella ODN alcun dispositivo attivo che abbia funzioni di *switching* a livello MAC. Ciò implica che tutte le tipologie di reti PON necessitino di tecniche di *multiplexing*, per combinare a livello fisico tutti i segnali in *downstream*, e allo stesso modo di tecniche di accesso multiplo per combinare i segnali in *upstream*.

Come si è già detto, il focus di questo lavoro è l'innovativo (per le reti di accesso) *multiplexing* a divisione di lunghezza d'onda; l'alternativa oggi enormemente più diffusa e convenzionale è rappresentata dalla TDM che è alla base anche dello standard G-PON

impiegato nella soluzione FTTH di Telecom Italia. Le reti TDM PON sono certamente la soluzione meno articolata da implementare secondo una valutazione tecnico-economica a breve termine, permettendo di limitare i CapEx soprattutto nella fase di avvio della realizzazione di una nuova soluzione NG-PON.

In una rete ottica che utilizzi la tecnica TDM a ciascun utente è assegnato un *time slot* per ricevere e un *time slot* per trasmettere utilizzando una portante ottica (una "lambda"), generalmente in terza finestra ottica per il *downstream* ed in seconda finestra per l'*upstream*. La gestione dell'assegnazione dei *time slot* per la trasmissione in *upstream* utilizza algoritmi di *ranging* e di assegnazione dinamica della banda (DBA) per evitare la collisione dei pacchetti e per garantire nel contempo i parametri di banda contrattualizzati con il cliente. [8]

Il limite principale di questa tipologia di rete è la limitata scalabilità, ovvero la ridotta capacità di consentire un *upgrade* del sistema per adeguarlo alle future necessità legate sia a mutate tipologie di traffico che a crescenti esigenze di banda. Al momento la condivisione della banda tra diversi utenti di una rete TDM PON, infatti, non influenza significativamente le prestazioni percepite dagli utenti finali. Questo accade perché, fino ad ora, l'utilizzo della rete è avvenuto prevalentemente a *burst*, ovvero con richieste significative di banda circoscritte in un breve arco temporale; azioni come il *browsing* mediante HTTP, lo scambio di mail su SMTP, il *file-sharing* con il *Peer-to-Peer* o il trasferimento di dati basato su FTP sono tutte attività che generano

traffico intermittente o a *burst* e che quindi possono essere statisticamente multiplate tra loro senza che l'utente di fatto percepisca un significato degrado della qualità. Oggi, però, i contenuti video e multimediali stanno rapidamente diventando la tipologia di traffico principale sia per percentuale di tempi di uso che di traffico, come dimostrato dalle previsioni riportate in Figura 1b⁵. I contenuti multimediali non solo richiedono un'ampia larghezza di banda ma, per di più, non possono essere statisticamente multiplati, pena un forte degrado della qualità del servizio, in quanto prevedono una fruizione continua e quindi un *data stream* che saturerebbe facilmente la capacità delle attuali reti TDM PON⁶. Non va assolutamente trascurata, d'altronde, anche la necessaria concentrazione che la OLT deve operare sull'interfaccia di *uplink* che potrebbe diventare il collo di bottiglia, se non opportunamente dimensionata.

Una possibilità per rendere scalabili le reti TDM PON è quella di suddividere un singolo albero PON in più alberi PON (riducendo contestualmente il fattore di *splitting*) in modo che ognuno di questi serva un numero inferiore di clienti e ciascun utente abbia a disposizione più banda; un'altra possibilità è quella di incrementare il *bit rate* (come per esempio nella XG-PON). Entrambe queste soluzioni, tuttavia, non sono *cost-effective* e facilmente scalabili per un futuro ulteriore e significativo incremento della domanda di banda: l'aumento del *bit rate* in *downstream*, per esempio, metterebbe a dura prova, oltre le attuali possibilità, l'elettronica presente nelle ONU che operano al *bit rate* operativo di sistema, molto più

4 In uno scenario a lungo termine, soluzioni quali la TWDM e WDM saranno presumibilmente utilizzate anche per la cosiddetta CO *consolidation*, ovvero per concentrare gli apparati di terminazione (OLT) in centrali più lontane rispetto a quelle dove ora afferiscono i clienti finali, riducendo in tal modo il numero complessivo di centrali ma aumentando sensibilmente la distanza media cliente-CO.

5 http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI_Hyperconnectivity_WP.html

6 Nella soluzione FTTH G-PON di Telecom Italia, ciascuno dei 64 utenti dell'albero G-PON potrebbe disporre di una banda lorda di circa 39 Mb/s se tutti fossero contemporaneamente attivi.

alto rispetto al *bit rate* effettivo di ciascun utente⁷.

Un ulteriore aspetto delle TDM PON, inoltre, è rappresentato dal fatto che, stabilito il numero di utenti serviti da ciascun albero PON, le perdite di potenze per gli *splitter* passivi sono fisse e questo limita fortemente il *power budget* a disposizione per i vari collegamenti. In un albero G-PON con fattore di *splitting* 1:64 si ha una perdita dovuta al solo *splitting* pari a 18 dB, mentre nel caso di 1:128 sarebbe di 21 dB.

Queste considerazioni rendono evidente il perché, in definitiva, la TDM PON non rappresenti una tecnologia *future proof* che potrà soddisfare, a lungo termine, la domanda di banda e il traffico multimediale via via crescenti. [1]

D'altro canto, una WDM PON permetterebbe a ciascun utente di avere una banda dedicata su un'infrastruttura condivisa e sarebbe pertanto scalabile in modo concettualmente semplice: per aumentare il numero di utenti serviti da un albero PON, per esempio, sarebbe sufficiente infittire la griglia delle portanti WDM, passando a soluzioni DWDM o UDWDM, peraltro già dimostrate nella letteratura scientifica (vedi box di approfondimento). Un altro potenziale vantaggio delle reti WDM PON è costituito dalla possibilità offerta da questa tecnologia di effettuare un *merge*, tra le reti d'accesso e le reti metro utilizzando, per queste ultime, architetture ad anello che prevedano ROADM per il *wavelength routing*. Ciò permetterebbe la realizzazione di una rete integrata accesso-aggregazione-trasporto *all-optical* altamente flessibile, riconfigurabile, dinamica e con bassi OpEx. [9]

Oltre alla TDM e alla WDM citate finora, esistono ulteriori tecniche

di *multiplexing* che è opportuno citare, sebbene si tratti di soluzioni proposte per le reti d'accesso PON tuttora a livello embrionale, ovvero:

- OCDM (*Optical Code Division Multiplexing*);
- OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*);
- PDM (*Polarization Division Multiplexing*);
- SDM (*Space Division Multiplexing*).

La tecnica OCDM è mutuata dalle tecnologie radiomobili (la moltiplicazione a divisione di codice è alla base anche degli standard UMTS ed LTE) e rappresenterebbe una valida alternativa alle WDM PON, soprattutto perché si tratta di una tecnica *soft-limited*, in cui il numero di utenti può essere notevolmente incrementato con l'accortezza, però, di tenere sotto controllo la *Multi-Access Interference*. L'OFDM, anch'essa diffusissima in ambito radio e nel DVB, è in linea teorica la tecnica di *multiplexing* con più alte prestazioni (potrebbe garantire fino a 100 Gb/s/ch) grazie all'elevata efficienza spettrale (bit/s per Hz di banda del canale trasmissivo) ottenuta tramite la sovrapposizione delle sottobande, ma presenta criticità implementative a causa dell'elevata complessità dei ricevitori che richiederebbero evoluti e molto veloci DSP ed FPGA.

Soluzioni alternative ancor meno convenzionali sono rappresentate dalla PDM che utilizza contemporaneamente entrambe le polarizzazioni ortogonali che si propagano lungo una fibra, e dalla SDM, che comprende l'utilizzo di più fibre affasciate (soluzione banale ma costosa), di fibre particolari *multi-core* o dei diversi modi di propagazione presenti nelle fibre multimodali (*Mode Division Multiplexing*).

È possibile e, per certi versi, auspicabile il ricorso ad approcci ibridi che sfruttino al meglio le potenzialità delle diverse tecniche di *multiplexing* succitate. Un approccio ibrido tra TDM e WDM, per esempio è quanto mai opportuno per favorire un'introduzione graduale e *cost-effective* dei componenti WDM sulle reti in fibra ottica attualmente presenti.

A prescindere dalla tecnica di *multiplexing* adottata, le reti d'accesso stanno evolvendo anche dal punto di vista delle tecniche di modulazione, ovvero delle modalità in cui l'informazione associata a ciascun *data stream* è "impressa" sul segnale ottico relativo a ciascuno dei canali multiplati tra loro. La tecnica adottata convenzionalmente, la IM-DD basata su OOK (*On-Off Keying*), infatti, non consente un incremento del *bit rate* non solo per l'aumento di complessità dei *transceiver* e per la comparsa di effetti indesiderati come il *chirping*, ma anche e soprattutto a causa di un contesto in cui, come nel caso delle UDWDM PON, la larghezza di banda disponibile per ciascun canale è fortemente ridimensionata. Si rende necessaria, quindi, l'adozione di tecniche di modulazione avanzate, ovvero di soluzioni multilivello da tempo applicate su altri mezzi trasmissivi, in cui a ciascun simbolo trasmesso sulla fibra ottica siano associati più bit, migliorando quindi l'efficienza spettrale. L'approccio più intuitivo e *cost-effective* è il ricorso a tecniche multilivello di ampiezza M-ASK (*M-ary Amplitude Shift Keying*), in cui a ciascuno degli *M* livelli di ampiezza discreti previsti sono associati $\log_2 M$ bit, consentendo un proporzionale incremento del *bit rate*. Si tratta della naturale estensione della OOK che può es-

⁷ Nell'offerta commerciale FTTH G-PON di Telecom Italia, per esempio, le ONT lavorano in downstream a 2,5 Gb/s per una banda massima di 100 Mb/s per utente.

Gli standard WDM e le soluzioni UDWDM

Le reti WDM PON, nonostante l'ampia eco che stanno ricevendo nel mondo della ricerca e le prime sperimentazioni in contesti operativi, ad oggi non sono ancora state oggetto di definizione di standard da parte degli organismi internazionali di normazione. D'altra parte sistemi WDM *tout court* sono stati da tempo standardizzati dalla ITU-T.

Lo standard CWDM, ovvero la WDM "a grana grossa", definito nella ITU-T G.694.2 [1], prevede fino ad un massimo di 18 portanti ottiche ampiamente spaziate tra loro (*spacing* di m) su una banda ottica complessiva molto estesa, dalla seconda alla terza finestra. Nello standard DWDM (*Dense WDM*), ovvero la WDM "a grana fine", definito nella ITU-T G.694.1 [2], si possono implementare 40, 80, 160 o 320 portanti nella

sola terza finestra, con una spaziatura tra i canali rispettivamente di 100 GHz, 50 GHz, 25 GHz o 12.5 GHz. È evidente che l'infittimento della griglia delle portanti è orientato ad un'ottimizzazione dell'utilizzo dell'intera banda disponibile sulla fibra ottica, aumentando il numero dei canali, ma comporta specifiche molto più vincolanti per i componenti ottici, sia passivi che attivi.

Sono attualmente in fase di studio e sperimentazione anche reti UDWDM con *spacing* tra i canali di 6.25 GHz e 3.125 GHz e notevole incremento del numero di canali disponibili. Una delle migliori prestazioni raggiunte sinora è rappresentata dalle reti UDWDM PON di *Nokia Siemens Networks* che, come mostrato in Figura A, prevedono una spaziatura di appena 2.8 GHz con

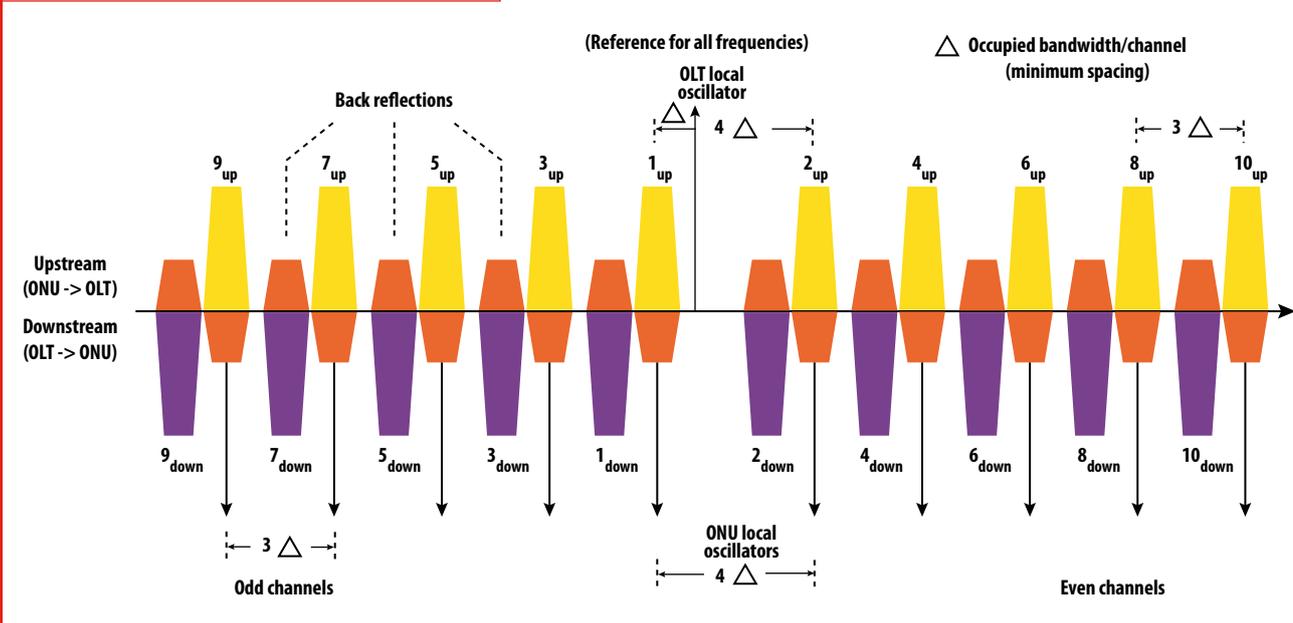
un'alternanza tra canali *upstream* e *downstream* denominata Paired Channel Technology™. [3] Indipendentemente dalla griglia di riferimento, la WDM, all'interno dello stack ISO/OSI, rappresenta un sottostrato fisico al Livello 1 completamente trasparente rispetto ai protocolli di livello superiore ■

[1] ITU-T Recommendation T-REC G.694.2 – 12/2003, "Spectral grids for WDM applications: CWDM wavelength grid".

[2] ITU-T Recommendation T-REC G.694.1 – 02/2012, "Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid".

[3] Nokia Siemens Networks, "Future optical connectivity", Technical White Paper, 2012.

Figura A - UDWDM channel plan di Nokia Siemens Networks



sere considerata, a tutti gli effetti, una 2-ASK. Per la demodulazione di un segnale siffatto sarebbe sufficiente un rilevatore ad inviluppo, ovvero un semplice fotodiolo

con buone prestazioni in termini di linearità e *range* dinamico. Soluzioni più complesse prevedono, invece, la discriminazione dei simboli in base alla fase M-PSK

(*M-ary Phase Shift Keying*), oppure contestualmente sia all'ampiezza che alla fase M-APSK (*M-ary Amplitude and Phase Shift Keying*), tipicamente secondo co-

stellazioni rettangolari o ad anelli concentrici nel piano complesso (Figura 3). In questi ultimi casi, le prestazioni certamente più spinte sono in *trade-off* con ricevitori più complessi di tipo *coherent* o *self-coherent*, che comunque richiedono la presenza di un *90° hybrid* (un dispositivo ottico passivo, costituito tipicamente da accoppiatori direzionali e ritardatori di fase) e di fotodiodi aggiuntivi: ad oggi si tratta di soluzioni non facilmente implementabili su ampia scala (in un contesto com'è quello delle reti di accesso), quanto piuttosto nei *transceiver* delle reti a lunga distanza. [10] Sono state proposte, ma per ora stanno ricevendo scarso consenso, anche modulazioni di frequenza FSK (*Frequency Shift Keying*) e di polarizzazione PolSK (*Polarization Shift Keying*). Ulteriori innovazioni sono state proposte in merito alle tecniche di codifica di linea che sono relative al modo in cui i dati binari di ciascun *data stream* sono trasmessi per migliorare l'efficienza del sistema in termini di potenza trasmessa o di sagomatura spettrale, o per incrementare l'immunità al rumore o al *jitter*. Accanto alle tecniche di codifica più consolidate, ovvero la NRZ (*Non-Return to Zero*) e

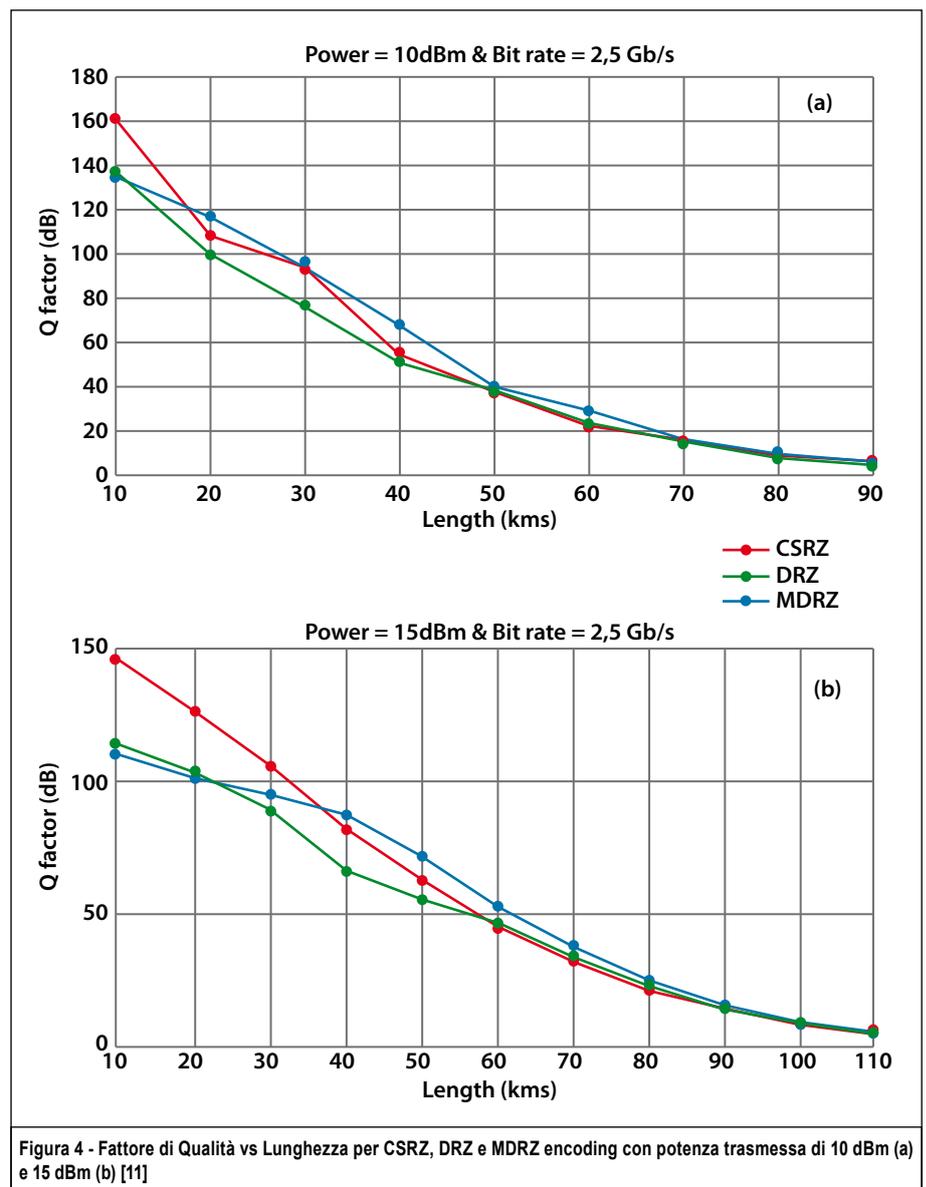
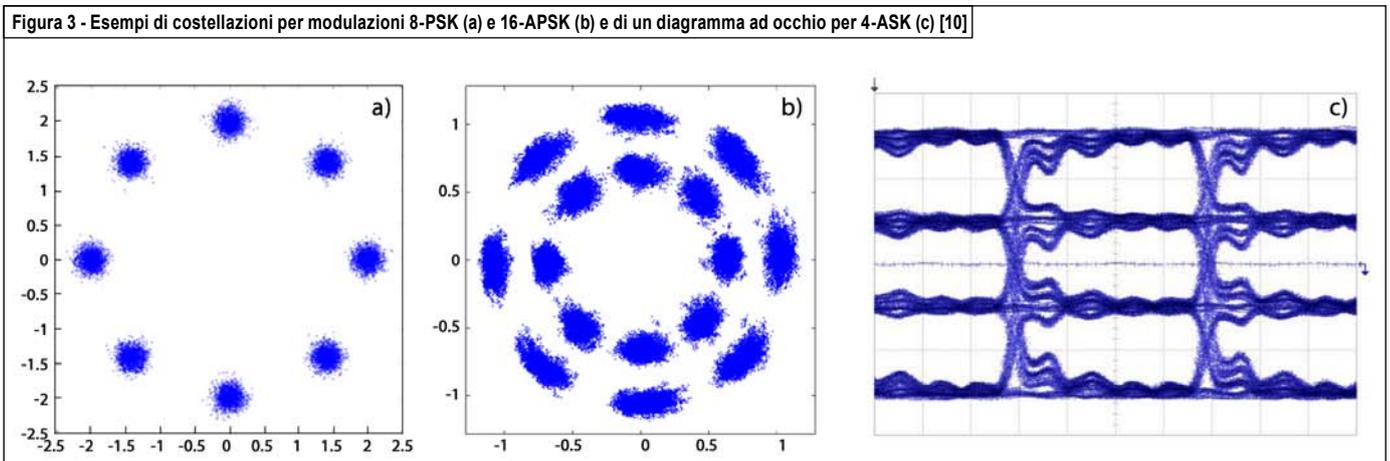


Figura 4 - Fattore di Qualità vs Lunghezza per CSRZ, DRZ e MDRZ encoding con potenza trasmessa di 10 dBm (a) e 15 dBm (b) [11]

Figura 3 - Esempi di costellazioni per modulazioni 8-PSK (a) e 16-APSK (b) e di un diagramma ad occhio per 4-ASK (c) [10]



la RZ (*Return-to-Zero*), sono state proposte tecniche come la codifica IRZ (*Inverse RZ*) che risulta particolarmente idonea nel caso in cui, come si illustrerà successivamente, il *transceiver* presente nell'ONU abbia necessità di rimodulare e trasmettere in *upstream* il segnale ricevuto in *downstream*. Tecniche come il DRZ (*duobinary RZ*), il CSRZ (*Carrier Suppressed RZ*) ed il MDRZ (*Modified Duobinary RZ*), permettono di migliorare la resilienza delle reti UDWDM PON nei confronti di effetti indesiderati quali la dispersione, la non linearità, lo *scattering*, ecc..., in termini di un migliore fattore di qualità (figura di merito legata funzionalmente alla probabilità di errore) come mostrato in Figura 4. [11]

4 Architettura di una rete WDM PON e principali componenti

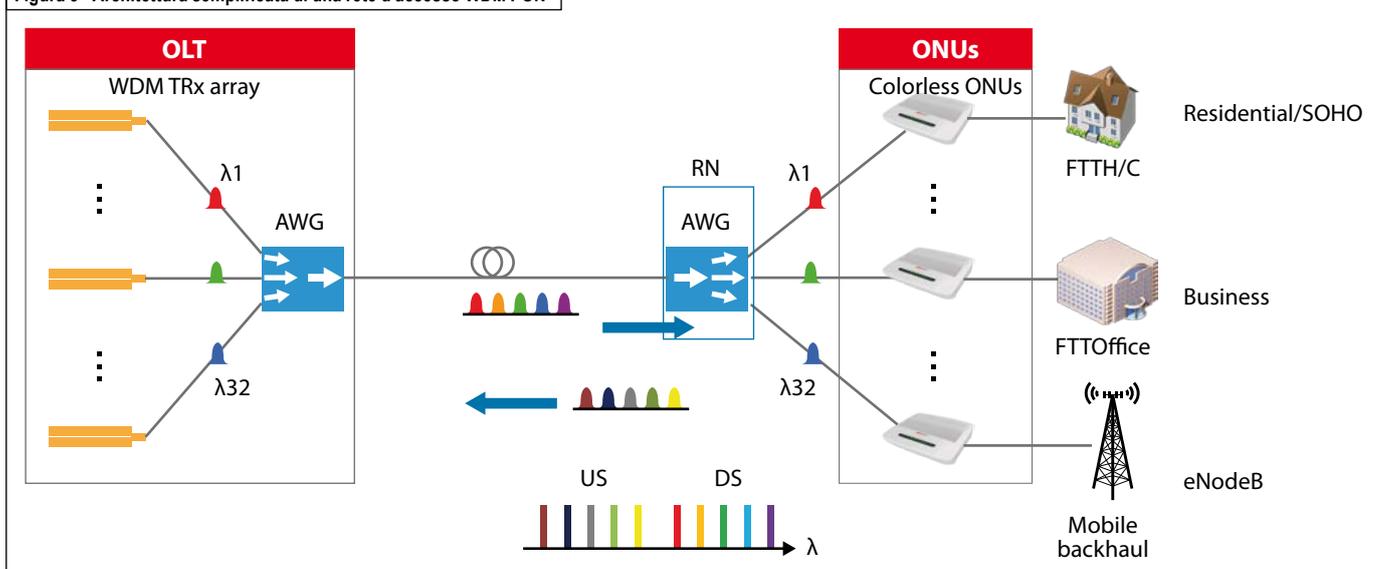
La Figura 5⁸ mostra schematicamente l'architettura di una rete WDM PON: i trasmettitori sintonizzati a diverse lunghezze d'onda sono presenti sia lato OLT, presso il CO, che lato ONU, presso cia-

scun utente (un cliente *consumer*, *business* o un *eNodeB*); un *multiplexer/demultiplexer* WDM (AWG) è inserito in centrale e nel nodo remoto (RN) per separare e ricombinare i diversi segnali con differenti lunghezze d'onda da e verso gli utenti finali. È da premettere che i componenti utilizzabili nelle reti WDM PON sono tutt'oggi oggetto di studio e di ricerca e numerose sono ancora le sfide da affrontare.

La disponibilità di sorgenti WDM affidabili e a basso costo è indispensabile per la realizzazione delle future reti WDM PON. Nelle reti TDM PON tradizionali, sia lato OLT che lato ONU, tipicamente sono utilizzati laser a semiconduttore convenzionali, tipicamente di tipo *Fabry-Peròt*. In una rete WDM è necessario disporre, invece, di sorgenti ad elevata stabilità in lunghezza d'onda (questo è un requisito ancora più stringente per le reti DWDM e UDWDM). Per tale motivo si preferisce utilizzare laser DFB, dotati di ottime proprietà di modulazione *high speed* grazie alla ridotta larghezza spettrale (pochi MHz),

generalmente equipaggiati con elementi refrigeratori (TEC) necessari per compensare una deriva intrinseca della lunghezza d'onda di emissione di circa 0.1 nm/°C. Per ragioni di costo, tuttavia, risulterebbero più convenienti i laser a cavità verticale (VCSEL), se non fosse che attualmente sono ancora in fase embrionale per la lunghezza d'onda di 1550 nm, a causa delle proprietà ottiche e termiche non eccellenti dei materiali che li costituiscono. [1] L'aumento dei *bit rate* richiesti alle reti WDM PON (superiore ai 2.5 Gb/s), nonché l'opportunità di adottare le già citate tecniche di modulazioni avanzate, renderà necessario il ricorso alla modulazione esterna: il fenomeno del *chirping* associato alla modulazione diretta limiterebbe notevolmente la lunghezza di tratta. Per velocità di modulazione superiori ai 10 Gb/s è necessario modulare la portante ottica emessa dalla sorgente laser mediante un modulatore esterno ad elevato *extinction ratio*⁹, a banda larga e con basse perdite di inserzione, tipicamente di tipo MZI o EAM. [1]

Figura 5 - Architettura semplificata di una rete d'accesso WDM PON



⁸ http://www.ecoc2010.org/contents/attached/c20/WS_5_Cheng.pdf (Huawei)

⁹ Rapporto tra il livello di potenza ottica associato al bit '1' e quello associato al bit '0'. Più alto è il valore di tale parametro, minore è la potenza ottica media necessaria per avere un determinato BER.

Per quanto riguarda le fibre ottiche impiegabili per le reti WDM PON, sarebbe particolarmente indicato l'utilizzo di fibre LWP, come quelle definite dagli standard ITU-T G.652 di categoria C e D (le cosiddette *dry fibers*), che presentano un picco di assorbimento a 1390 nm, dovuto alla presenza di ioni ossidrilici, fortemente attenuato, consentendo uno sfruttamento dell'intera banda da 1300 nm a 1650 nm e la copertura con continuità dell'intervallo dalla seconda alla terza finestra.

La funzione di *multiplexer/demultiplexer* è svolta da un AWG, un dispositivo ottico passivo costituito, in generale, da M ingressi, N uscite e due accoppiatori a stella planari collegati da K guide d'onda (vedere riquadro). Se un segnale WDM in *downstream* incide su una porta di ingresso, esso risulterà separato nelle sue diverse componenti cromatiche alle diverse porte di uscita (Figura B nel riquadro); il comportamento esattamente reciproco si verificherà in *upstream*. Le proprietà

più interessanti di questo dispositivo sono le basse perdite di inserzione, indipendentemente dal numero di porte (a differenza degli *splitter* presenti nelle reti TDM PON), e la già citata reciprocità anche in intervalli distanti di lunghezze d'onda (come tipicamente avviene nelle WDM PON).

Una delle sfide aperte per l'uso degli AWG nelle reti WDM PON è la deriva termica delle lunghezze d'onda relative alle sue porte (dell'ordine di $0.01 \text{ nm}/^\circ\text{C}$): ciò può implicare un disallineamento

Gli Arrayed Waveguide Grating (AWG)

Gli *Arrayed Waveguide Grating* sono componenti ottici passivi fondamentali per la realizzazione di soluzioni PON basate su WDM. Come mostrato nella Figura B nel caso di un AWG 1:N, essi hanno una struttura le cui parti essenziali sono:

- una o più fibre ottiche in ingresso (1)
- due accoppiatori ottici planari (2) e (4)
- M guide d'onda aventi lunghezze differenti (3)
- N fibre ottiche in uscita (5)

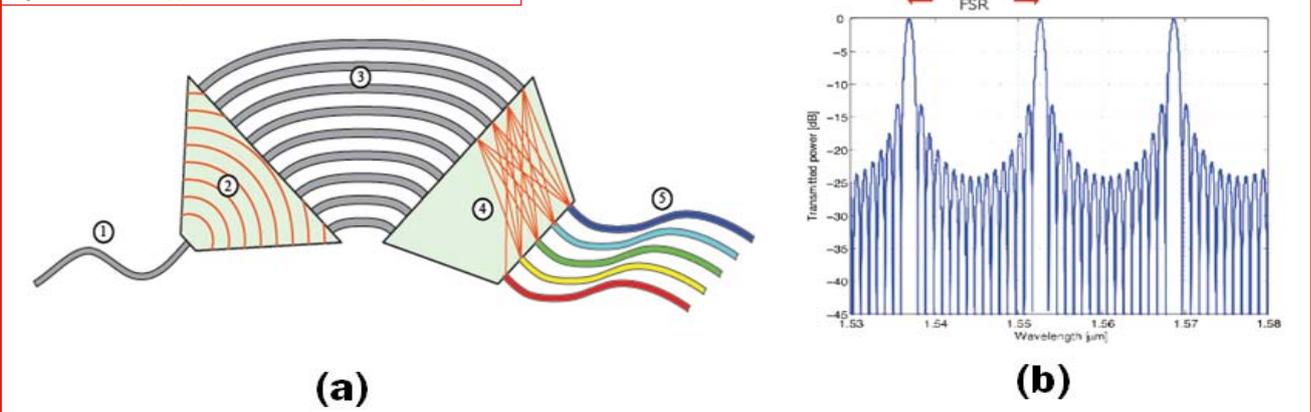
Il segnale proveniente dalla fibra ottica di ingresso (1) viene diffratto dall'accoppiatore (2) ed entra nell'array di gui-

de (3). Ciascuna guida rispetto a quella adiacente differisce di una lunghezza costante pari a ΔL . Ciò introduce uno sfasamento del segnale tra una guida e quella adiacente anch'essa costante e proporzionale a ΔL . Il segnale di una generica guida viene quindi inviato tramite l'accoppiatore (4) su tutte le fibre in uscita. Qui le varie componenti del segnale si ricombinano distruttivamente o costruttivamente con quelle dei segnali provenienti dalle altre guide d'onda permettendo quindi di avere sulla singola fibra ottica in uscita una sola componente del segnale WDM in in-

gresso. Nella direzione opposta avviene assolutamente il contrario, nel senso che i vari segnali 'colorati' entranti in ciascuna delle fibre (5) si ritrovano moltiplicati nella fibra (1). La tipica funzione di trasferimento di un AWG è quella della figura seguente. Come si vede, lo spettro mostra una ciclicità, denominata FSR (*Free Spectral Range*) che può essere opportunamente sfruttata per moltiplicare al suo interno un numero N di canali di ampiezza ΔL qualora si soddisfi la seguente relazione:

$$FSR = N \cdot \Delta L$$

Figura B - Struttura (a) e funzione di trasferimento (b) di un AWG



tra le porte dell'AWG presente in CO e di quello localizzato nel RN, esposti a diverse condizioni ambientali. Un possibile approccio per garantire la consistenza *real-time* tra le lunghezze d'onda prevede l'utilizzo di AWG atermici. Questi fanno uso di guide d'onda realizzate in materiali con coefficiente termo-ottico negativo o di una compensazione ottenuta controllando meccanicamente le parti che compongono il dispositivo. [12]

5 Principali sfide tecnologiche

L'implementazione di sorgenti laser *cost-effective* nelle ONU rappresenta la principale delle sfide ancora aperte che decreteranno le tempistiche con cui probabilmente avverrà la diffusione su larga scala delle reti WDM PON. La principale esigenza è la disponibilità di *colourless* ONU, ovvero di ONU il cui funzionamento sia garantito indipendentemente dalla lunghezza d'onda operativa dell'utente: l'utilizzo nelle ONU di sorgenti *colored*, ovvero funzionanti ad una sola lunghezza d'onda, sarebbe chiaramente ingestibile per problemi logistici di *inventory*. L'ulteriore sfidante requisito è che l'ONU risulti *coolerless*, ovvero non necessiti di moduli TEC per il raffreddamento al fine di ridurre il più possibile i costi e i consumi energetici. Queste specifiche rendono estremamente inopportuno l'utilizzo di sorgenti sintonizzabili alle diverse lunghezze d'onda, seppure si tratti di soluzioni tecnologicamente disponibili: esistono infatti VCSEL sintonizzabili mediante MEMS che, tuttavia, non posseggono una buona stabilità intrinseca della

lunghezza d'onda di emissione al variare della temperatura e che quindi dovrebbero essere termocollati.

Svariati possibili approcci per implementare *colourless* e *coolerless* ONU sono stati dimostrati, tra i quali i più importanti prevedono l'utilizzo di SS-BLS (*Spectral Sliced Broadband Light Sources*), di IL FP (*Injection-Locked Fabry-Perot Lasers*), oppure di RSOA (*Reflective SOA*). La caratteristica comune a questi approcci consiste nel fatto che la lunghezza d'onda di emissione delle sorgenti presenti nelle ONU non è determinata dal mezzo attivo delle sorgenti stesse, bensì da fattori esterni come filtri ottici o segnali iniettati (*'seeded'*), in modo tale che le lunghezze d'onda possano essere gestite più semplicemente riducendo l'impatto della temperatura o di altri fattori ambientali sulle ONU.

Negli SS-BLS, come mostrato in Figura 6a⁸, un pettine di lunghezze d'onda viene ottenuto "affettando" lo spettro di una sorgente luminosa a banda larga, quale può essere un diodo super luminescente (SLED) presente nella ONU. Per la selezione delle singole lunghezze d'onda tipicamente è utilizzato un AWG lato ONU che "affetta" lo spettro e preserva una singola lunghezza d'onda per ciascun utente. Com'è evidente si tratta di un'implementazione piuttosto semplice e a basso costo che, tuttavia, limita la velocità di modulazione e la potenza associata a ciascun segnale, riducendo di fatto il *power budget* e la massima lunghezza di tratta.

Nei laser IL FP, come mostrato in Figura 6b⁸, un segnale ottico esterno a banda stretta (*'seed'*) è iniettato nel dispositivo presente nella ONU, ovvero una cavità FP con molteplici modi longitudinali

risonanti, permettendo ad un solo modo (quello alla stessa lunghezza d'onda del *seed*) di sopravvivere alla *mode competition* sopprimendo così gli altri modi.

La soluzione *colourless* e *coolerless* che riscuote più ampio consenso è tuttavia quella che non prevede la presenza di alcuna sorgente ottica nell'ONU e l'uso di CLS (*Centralized Light Sources*) presso l'OLT: come mostrato in Figura 6c⁸, la griglia di portanti ottiche per i segnali in *upstream* verrebbe generata al CO (per esempio con una SS-BLS localizzata nell'OLT), inviata verso l'ONU, modulata all'interno dell'ONU stessa e ritrasmessa verso l'OLT, dopo un'eventuale operazione di amplificazione ottica. L'operazione di modulazione e amplificazione potrebbe essere svolta da un unico componente: un RSOA (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier*), ovvero un amplificatore ottico a semiconduttore con una faccia riflettente al 100% in cui la modulazione avviene direttamente controllando il guadagno tramite una corrente di iniezione; sono attualmente in fase di studio soluzioni che permettano al RSOA di fare a meno del modulo TEC. Con il duplice fine di ridurre i consumi energetici e rendere più efficiente l'uso della banda a disposizione sulle fibre ottiche, è stato recentemente proposto il riuso in *upstream* dei segnali ricevuti in *downstream*, tramite la rimodulazione dei dati ricevuti opportunamente codificati (come si accennava in precedenza), con tecniche di modulazione più semplici e con un *bit rate* più basso (Figura 6d⁸). Ciò permetterebbe una trasmissione *full duplex* sulla stessa lunghezza d'onda, sebbene ci siano criticità da superare in relazione al *surplus* di rumore dovuto al *backscattering* di Rayleigh lungo la ODN.

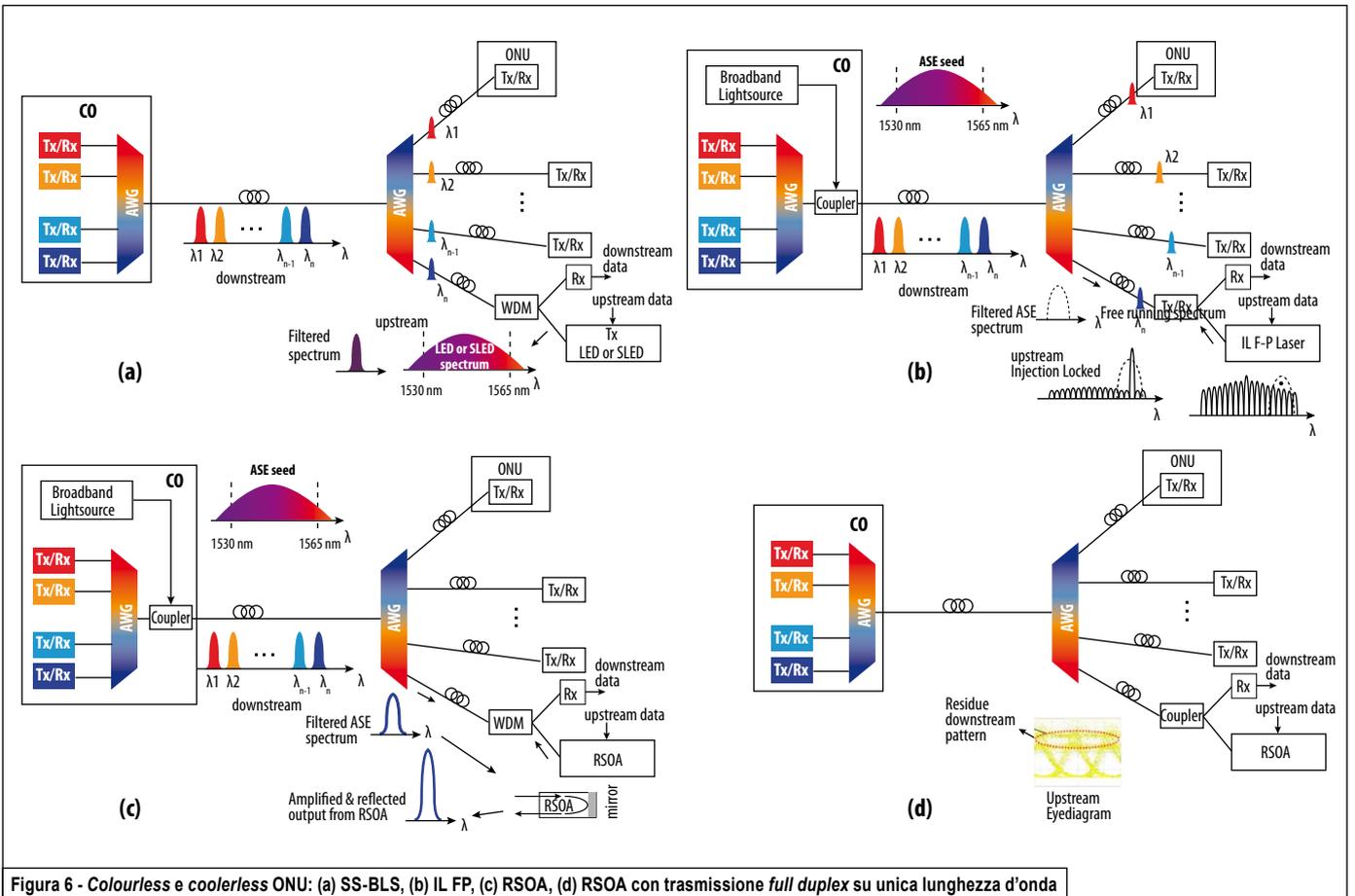


Figura 6 - Colourless e coolerless ONU: (a) SS-BLS, (b) IL FP, (c) RSOA, (d) RSOA con trasmissione full duplex su unica lunghezza d'onda

Conclusioni

Le reti WDM PON rappresenteranno, con ogni probabilità, la sfida implementativa dei prossimi anni per i costruttori e per gli operatori di TLC. Queste reti, come si è detto, costituiranno la risposta tecnologica alla crescente domanda di servizi *bandwidth hungry*, il cui driver principale sarà essenzialmente la componente video nelle sue varie declinazioni. L'implementazione di nuove soluzioni per la NGAN dovrà seguire la *roadmap* tracciata dal gruppo FSAN in ambito NG-PON e dei requisiti fissati dagli standard ITU-T [13], tenendo conto delle problematiche presenti in contesti *brownfield* nei quali sarà opportuno garantire:

- il riuso della ODN, preferibilmente evitando (ma non escludendo) l'uso di *Reach Extender*, ovvero amplificatori ottici, per superare i vincoli di power budget imposti dalla presenza degli *splitter* ottici;
 - la coesistenza con i sistemi *legacy* (TDM PON) per esempio mediante lo *stacking* di più sistemi attraverso la WDM, con la conseguente necessità di installare filtri presso le ONU.
- A tal proposito, una delle migliori soluzioni adottabili nella fase transitoria della migrazione dalle reti G-PON alle reti WDM PON è l'architettura ibrida TWDM PON, in cui più sistemi TDM sono multiplexati tra loro mediante WDM: in altre parole, la singola λ trasporta un flusso già multiplexato in TDM,

per esempio una trama G-PON o XG-PON, consentendo in tal modo di aumentare la capacità dell'albero G/XG-PON di tante volte quante sono le lunghezze d'onda multiplexate, ottenendo per esempio 40 Gb/s DS e 10 Gb/s US. [13] Questa tipologia di rete è infatti quella scelta in ambito FSAN per la NG-PON2 essendo, nel breve periodo, un ottimo compromesso tra costi, prestazioni e tecnologia disponibile. L'utilizzo esclusivo della tecnica WDM nelle reti PON deve essere vista nel lungo termine, quando si disporrà di tecnologia WDM matura e a costi sostenibili per un utilizzo massivo nella rete di accesso. A nostro parere, la soluzione WDM PON potrà essere il supporto tecnologico *cost-effective* e abilitante

per nuovi servizi negli scenari di mercato di domani ■

Acronimi

AWG	Array Waveguide Grating
BER	Bit Error Ratio
CapEx	Capital Expenditure
CO	Central Office
CWDM	Coarse WDM
DBA	Dynamic Bandwidth Assignment
DFB	Distributed Feedback
DSP	Digital Signal Processors
DVB	Digital Video Broadcasting
DWDM	Dense WDM
EAM	Electro-Absorption Modulator
FPGA	Field Programmable Gate Array
FSAN	Full Service Access Network
FTTCab	Fiber To The Cabinet
FTTH	Fiber To The Home
G-PON	Gigabit Capable PON
HDTV	High Definition TV
IM-DD	Intensity Modulation Direct Detection
ITU-T	International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Bureau
LWP	Low Water Peak
MAC	Medium Access Control
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Structures
MZI	
NGAN	Mach-Zender Interferometer Next Generation Access Network
NG-PON	Next Generation - PON
ODN	Optical Distribution Network
OLO	Other Licensed Operators
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
OpEx	Operational Expenditure
P2MP	Point To MultiPoint
PIC	Photonic Integrated Circuit
PON	Passive Optical Networks

QoS	Quality of Service
RN	Remote Node
ROADM	Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexers
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TEC	Thermo-Electric Cooler
UDWDM	Ultra Dense WDM
VCSEL	Vertical Cavity Surface Emitting Laser
WDM	Wavelength Division Multiplexing



Bibliografia

- [1] Leonid G. Kazovsky, Ning Cheng, Wei Tao Shaw, David Gutierrez, Shing-Wa Wong, "Broadband Optical Access Networks", Wiley, 2011.
- [2] Paola Cinato, Flavio Marigliano, Maurizio Valvo, "Evoluzione tecnologica per la rete NGAN", Notiziario tecnico Telecom Italia, n. 2/2012.
- [3] Sito ufficiale FSAN (NG-PON Task Group): <http://www.fsan.org/task-groups/ngpon/>.
- [4] Sergio Augusto, Valentina Brizi, Rossella Tavilla, "L'evoluzione della trasmissione ottica", Notiziario tecnico Telecom Italia, n. 1/2009.
- [5] Ryohei Urata, Hong Liu, Cedric Lam, Pedram Dashti, Chris Johnson, "Silicon Photonics for Optical Access Networks", IEEE 9th International Conference on Group IV Photonics, 2012.
- [6] Claudio Bianco, Flavio Cucchietti, Gianluca Griffa, "Energy Consumption Trends in the Next Generation Access Network - a Telco Perspective", 29th International Telecommunications Energy Conference, 2007.
- [7] Caroline P. Lai et. al., "Energy-Efficient Colourless Photonic Technologies for Next-Generation DWDM

Metro and Access Networks", International Conference on Photonics in Switching, 2012.

- [8] Marco De Bortoli, Roberto Mercinelli, Paolo Solina, Alder Tofanelli, "Tecnologie ottiche per l'accesso: le soluzioni Passive Optical Network", Notiziario tecnico Telecom Italia, n. 1/2004.
- [9] Josep Segarra, Vicent Sales, Josep Prat, "Agile Reconfigurable and Traffic Adapted All-Optical Access-Metro Networks", 11th International Conference on Transparent Optical Networks, 2009.
- [10] Nikolaos Sotiropoulos, "Advanced Modulation Formats for Optical Access Networks", Proefschrift, Technische Universiteit Eindhoven, 2013.
- [11] Malti, Meenakshi Sharma, Anu Sheetal, "Comparison of CSRZ, DRZ and MDRZ Modulation Formats for High Bit Rate WDM-PON System using AWG", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 2, 2012.
- [12] Huawei Technologies Co., "Next Generation PON Evolution", Technical White Paper, 2010.
- [13] ITU-T Recommendation T-REC G.989.1 - 3/2013, "40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements".

tommaso.muciaccia@telecomitalia.it
sandro.pileri@hrs.telecomitalia.it

**Tommaso Muciaccia**

ingegnere elettronico, entra in Azienda nel 2012. Oggi si occupa della progettazione esecutiva delle infrastrutture per la rete d'accesso in rame e fibra ottica, con particolare riferimento ai progetti NGAN ed EUROSUD per lo sviluppo delle reti ultra-broadband. Collabora con il Photonics Research Group del Politecnico di Bari ed è coautore di pubblicazioni su riviste scientifiche internazionali.

**Sandro Pileri**

ingegnere elettrotecnico con master in telecomunicazioni, entra nel 1982 alla Scuola Superiore Guglielmo Reiss Romoli, iniziando l'attività di docenza nel campo delle reti telefoniche PSTN, ISDN, Rete Intelligente e delle reti dati (Frame Relay, ATM e IP). Negli ultimi anni si è occupato di Telefonia su IP e di evoluzione della rete di accesso fissa. Dal 1999 al 2007 è stato professore a contratto del corso Reti e Sistemi di TLC presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di L'Aquila. Dal 2010 è in servizio presso Telecom Italia HR Services nella Service Unit Formazione.