

Hullámhossz konverzió megvalósítása félvezető optikai erősítők felhasználásával

KOVÁCS GÁBOR PH.D. HALLGATÓ

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Szélessávú Hírközlő és Villamosságtan Tanszék
gabor.kovacs@mht.bme.hu

Reviewed

Kulcsszavak: WDM, félvezető optikai erősítők, hullámhossz konverzió

Hullámhossz konverzió megvalósítására alkalmas eszköz kifejlesztése a WDM alapú optikai hálózatok hatékony kihasználásának egyik fontos kérdése. Követelmény ezen eszközökkel szemben az, hogy legyenek képesek az optikai csatorna hullámhosszának megváltoztatására az optikai tartományban. A cikkben rövid áttekintést adunk a lehetséges megoldási módzerekről, azok jellemzőiről és alkalmazhatóságáról, valamint az egyik ígéretes módszer paramétereinek vizsgálatáról.

WDM hálózatokban az útvonalak megfelelő kialakíthatósága, valamint a csatornahullámhosszak egyes linkeken történő ütközésének elkerülése érdekében szükség van arra, hogy egy adott csatorna a különböző linkeken más és más hullámhosszon kerüljön továbbításra, vagyis elengedhetetlen az átvitel során a hullámhossz átalakításának megoldása. A ma alkalmazott egyedüli lehetséges módszer az optikai-elektromos átalakítást használó hullámhossz konverterek. Egy ilyen berendezés tulajdonképpen nem tesz mást, mint hogy elektromossá alakítja a vett optikai jelet (elektromosan regenerálja) és a kimeneten az optikai szálra bocsátja egy új hullámhosszon. Előnye, hogy kiforrott technológiájú és kereskedelmi forgalomban is elérhető; hátránya, hogy nem nevezhető optikailag transzparens megoldásnak, hiszen egy teljes elektronikus szakaszt ékel két optikai link közé, aminek működése kódolás-függő. További korlátja, hogy a működési sebesség felső határát az elektronikus egység működési sebessége határozza meg.

A tisztán optikai megoldások vizsgálata több figyelmet érdemel, mivel ezek – bár jelenleg még kevésbé kiforrott módon állnak rendelkezésre – a teljesítményterületén jóval ígéretesebbek [1,2]. A cikk első részében a félvezető optikai erősítőt (Semiconductor Optical Amplifier – SOA) alkalmazó konverzió lehetséges megoldásait tekintem át, majd a második részben az egyik lehetséges módszer, a cross-gain moduláció megvalósíthatósága kerül részletesebben bemutatásra.

Hullámhossz konverziós módszerek

Számos követelményt támasztunk a hullámhossz konverterekkel szemben. A mindig növekvő átviteli igények kielégítése érdekében nagy sebességen kell üzemelniük, és a minél nagyobb áthidalható távolság érdekében kaszkádba kapcsolhatónak kell lenniük. További elvárások a berendezésben található részegységek alacsony száma (lehetőleg legyen egy chipbe integrálva), az alacsony teljesítményfelvétel, valamint a kimeneti hullámhossz gyors hangolhatósága.

Kapuzó módszerek

Ezzel az összefoglaló névvel azon megoldásokat illethetjük, melyek esetében egy külső forrás biztosítja az új hullámhosszú, folytonos intenzitású jelet, amit a félvezető optikai erősítő fog modulálni a bemenő jel valamely jellemzőjének – tipikusan intenzitás – változásának függvényében, valamilyen fizikai jelenség kihasználásával. A legelterjedtebben kutatott megoldások kerülnek bemutatásra a következőkben.

Mint ismert, a félvezető optikai erősítők működésében kulcsszerepet játszik az erősítő közeg aktív rétegében a pumpálás hatására felhalmozott töltéshordozó inverzió, vagyis a többségében a gerjesztett energiaszinten tartózkodó elektronok populációja. Ez a populáció biztosítja a közeg átlátszóságát, illetve az indukált emisszió révén az áthaladó optikai jelet képviselő foton-nyaláb erősítését.

Az ebben a fejezetben bemutatásra kerülő módszerek esetében a bejövő információs jel mindig a populációinverzióra lesz hatással, és ezen keresztül éri el az új hullámhosszú folytonos jel modulációját.

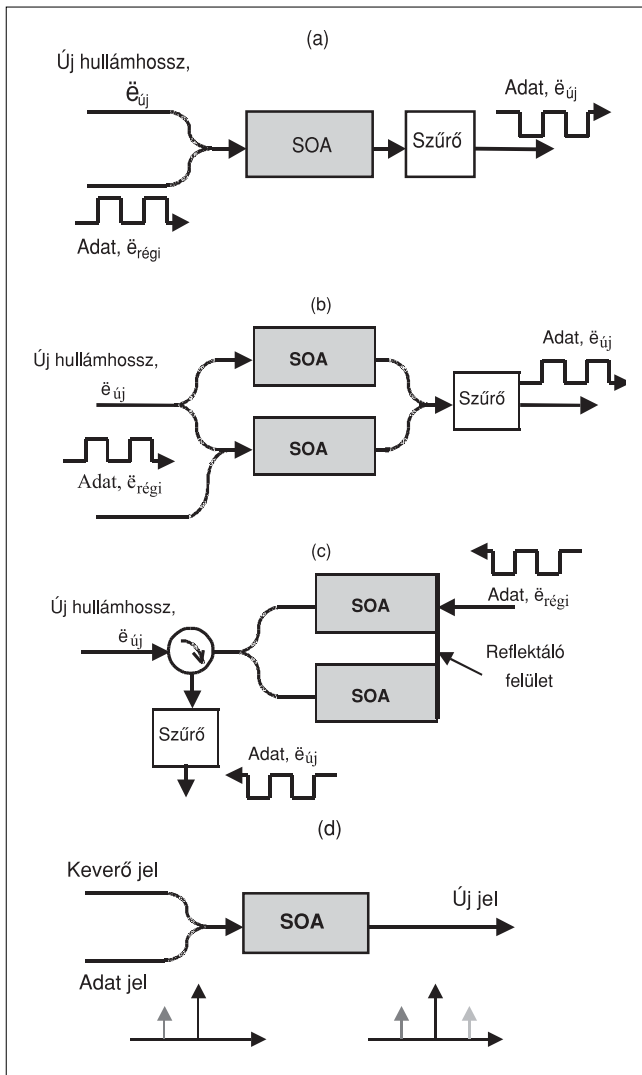
Kereszt-erősítéses moduláció (XGM)

A kereszt-erősítéses moduláció esetében a félvezető optikai erősítő erősítésértékének telítődését használjuk ki, arra alapozva, hogy a populációinverziót biztosító pumpáló forrás pumpálási sebessége és így az eszköz kimeneti teljesítménye véges.

Ennek következtében a telítési optikai teljesítménynél nagyobb bemenő teljesítmények esetén az erősítés lecsökken. Homogén erősítőközegről lévén szó ez a telítődés a teljes működési hullámhossztartományban bekövetkezik, így ez az erősítésváltozás érvényes az újhullámhosszú folytonos jelre is, melyet a régi, modulált jellel párhuzamosan vezetünk az eszközbe.

A konverter elrendezése az 1/a. ábrán látható.

Az információs jel intenzitásával fordítottan arányosan változik a SOA erősítése, és így módon külső modulátorként viselkedik az új jel számára.



1. ábra A különböző konverter megoldások blokkvázlata
 a) Kereszt-erősítéssel moduláció (XGM)
 b) XPM Mach-Zender interferométer
 c) XPM Michelson interferométer
 d) Hullámkeverés

A módszer előnye, hogy egyszerűen megvalósítható és működési sebessége 100 GHz-ig terjed. Hátránya, hogy nem teljesen transzparens, hiszen csak az intenzitásmodulált jeleket tudja konvertálni, hangolható optikai szűrőre van szükség a régi hullámhossz eltávolítására, valamint invertálja a jelet (bár ez utóbbi két tulajdonsága speciális kétlépcsős megoldással elkerülhető), illetve nehézséget jelenthet, hogy a beérkező régi jel intenzitását olyan szintre kell erősíteni, hogy az telítésbe tudja vinni az erősítőt. Erről az átalakítási módról a későbbiekben még részletesebben szólnunk [3,4,5].

Kereszt-fázis moduláció (XPM)

Ebben az esetben az új jel modulációját egy interferométer két ágában elhelyezett félvezetős optikai erősítő pár végzi. Az interferométer egyik ágába vezetjük a régi jelet, ami a populációinverzió keresztül törésmutató változást okoz az eszközben. Ez terjedési-idő változást fog eredményezni ebben az ágban, amit az interferometrius elrendezés intenzitásmodulációvá fog

alakítani. Az interferométerek tipikusan Mach-Zender vagy Michelson elrendezésűek, ahogy azt az 1/b. és 1/c. ábrák mutatják.

A kereszt-erősítéses modulációval összehasonlítva az interferométer használata azzal az előnnyel jár, hogy javítja a jel minőségét a chirp és az kioltási tényező tekintetében. A kompakt felépítés és a stabil működés elérése érdekében ajánlott a Mach-Zender interferométer két félvezetős optikai erősítőt egy chip-re integrálni, hiszen így a két erősítő azonos feltételek között működhet [6,7,8,9].

A működési sebesség ebben az esetben is 100 Gbit/s-os tartományba vihető, de laboratóriumi körülmények között 168 Gbit/s sebességet is demonstráltak már.

Kereszt-polarizáció moduláció (XPoIM)

A kereszt-polarizáció moduláció egy új, érdekes megoldás, ahol a polarizációs állapot megváltoztatásával érhetünk el modulációt az új hullámhosszú jelen [10].

Ebben az esetben azt használjuk ki, hogy egy polarizációs sugárosztó (Polarisation Beam Splitter – PBS) segítségével szűrhetjük az áthaladó optikai jelet a nyaláb polarizációs állapotának függvényében. A régi hullámhosszú jelnek ez esetben is intenzitásmodulálnak kell lennie.

Kiindulásképpen az újhullámhosszú folytonos jelet átvezetjük a félvezetős optikai erősítőn, és polarizációban illesztjük a PBS-hez, hogy azt teljesen átengedje. Ezután a régi jelet is bevezetjük a SOA-ba. A jel intenzitásváltozása változtatja az erősítő kettőtörő együtthatóját és ezáltal az új jel polarizációját, melynek következtében a PBS szűrni fogja a megváltozott polarizációs állapotú új jelet, ami intenzitásmodulációt eredményez a kimeneten.

Ezzel a módszerrel jobb kioltási tényező érhető el, mint XGM esetén, azonban ez jóval bonyolultabb megoldás, és a polarizációillesztés igénye nehezzé teszi az automatikus alkalmazhatóságát.

Hullámkeverési módszerek

A bevezetőben említett igény a tisztán optikai konverzió megvalósítására nem szinonimája a transzparens átvitel fogalmának. Bár az előző alfejezetben bemutatott megoldások tisztán optikai megoldások, nem nevezhetők transzparensnek, mivel nem őrzik meg az átvitt optikai jel minden jellemzőjét (fázis, polarizációs stb.), csupán annak intenzitását.

A hullámkeverési módszerek ezzel szemben a félvezetős optikai erősítő nem-linearitását kihasználva a bemenő jelekből hozzák létre a kimeneti új hullámhosszú jelet (vagyis nincs szükség arra, hogy az új kimeneti hullámhossz bemeneti jelként szerepeljen), és megőrzik az átalakítandó jel minden jellemzőjét. Vagyis ha valamely bemeneti jel modulációs tartalommal rendelkezik, az meg fog jelenni a kimeneti jelben. A hullámhossz pedig a bemeneti hullámhosszak lineáris kombinációja lesz (1/d. ábra).

A keverésben résztvevő bemeneti jelek száma alapján beszélhetünk négy- és három-hullámkeverésről (Four-Wave Mixing – FWM, Three-Wave Mixing – TWM), valamint különbségi frekvenciagenerálásról (Difference Frequency Generation – DFG), attól függően, hogy hányadrendű nem-linearitást használunk ki a konverzió során. A ma ismert konverziós módszerek közül a hullámkeverés ad egyedül teljes transzparenciát. Ezen felül alkalmasak több egymástól független csatorna párhuzamos átalakítására, a működés pedig a 100 GHz fölött is lehetséges. Hátránya ugyanakkor az alacsony hatékonyság, mivel az optikai nemlineáris hatások jóval gyengébbek, mint az elektronikusak. Ezt ellensúlyozhatja az aktív eszköz használata.

XGM vizsgálat

Az általános áttekintés után vizsgáljunk meg egy konkrét módszert. A hullámhossz konverzió egyik legigéretesebb megvalósítási módja a keresztterősítéses moduláció, ezért ennek vizsgálata külön figyelmet érdemel. Számítalan paraméter vizsgálata közül kettő különlegesen fontos, melyek jelentősen meghatározzák működést és az átalakítás hatékonyságát.

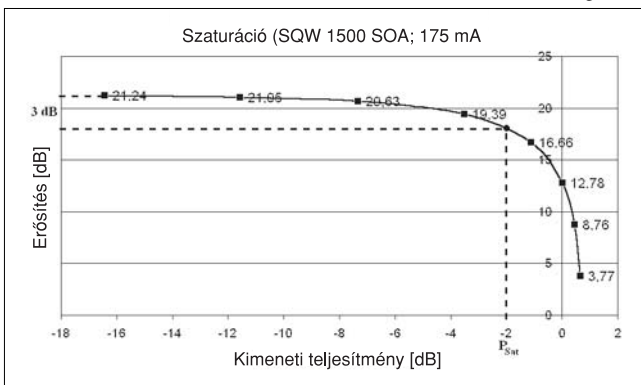
Telítődés jelenségének vizsgálata

A félvezetős optikai erősítő – cross-gain moduláció szempontjából – egyik legfontosabb sajátossága a telítés – idegen szóval: szaturáció – jelensége.

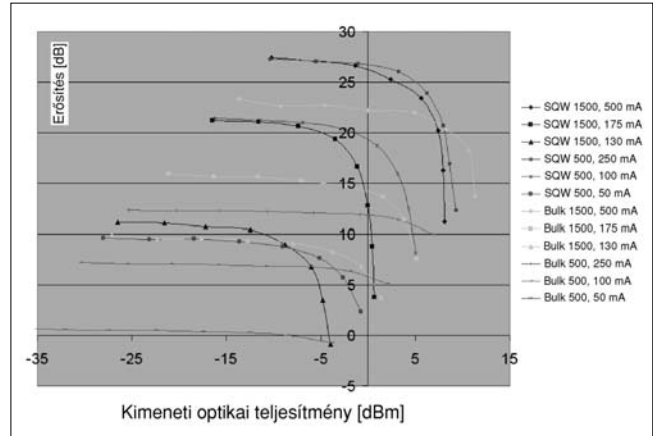
Mint az a korábbiakból kiderült, a populáció-inverzió külső pumpáló forrással hozható létre és tartható fent, mely állandó töltéshordozó mennyiséget juttat az eszközbe, és ezt a töltéshordozó populációt fogyasztja az erősítés folyamata. Amikor a bemeneti optikai teljesítmény nagy, akkor az erősítéshez is nagymennyiségű töltéshordozóra van szükség. A bemeneti optikai teljesítményt növelve létrejöhet tehát olyan állapot, hogy az erősítés jobban fogyasztja az eszközben jelenlevő töltéshordozó mennyiséget, mint ahogy azt a külső forrás pótolni tudja, vagyis a populáció-inverzió aránya és így az erősítés értéke is lecsökken.

Az erősítést a kimenő optikai teljesítmény függvényében ábrázolva kapjuk az eszköz telítési görbét, amit a 2. ábra tartalmaz.

2. ábra Telítési görbe



A görbén látható, hogy normál esetben az erősítő széles teljesítmény-tartományban közel konstans erősítéssel rendelkezik, majd elkezd telítődni. Azt a kimeneti optikai teljesítmény szintet, amelynél az erősítés mértéke a maximálisnál 3 dB-lel kisebb, *kimeneti telítési teljesítménynek* (szaturációs teljesítmény) nevezzük és P_{sat} -tal jelöljük. Azt a kimeneti teljesítményt pedig, amelynél nagyobb ez eszköz nem tud kiadni, maximális kimeneti teljesítménynek nevezzük.



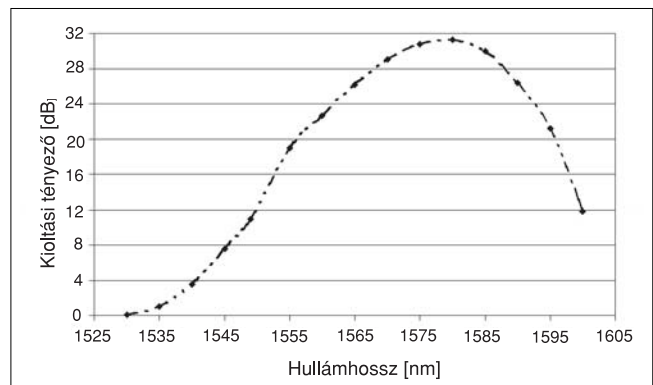
3. ábra Telítés mérése
Telítési görbék a különböző erősítőtípusokra a kimeneti optikai teljesítmény függvényében ($P_{be} = -28,75 \text{ dBm}$, $\lambda = 1552 \text{ nm}$)

Normál erősítőként való működés esetén a szaturációs teljesítmény minél magasabb értéke előnyös, hiszen így nagyobb teljesítményszintig tud erősíteni az eszköz. Azonban keresztterősítéses moduláció megvalósítása esetén ennek éppen az ellenkezője igaz, ugyanis hogy minél alacsonyabb szintű jelek is átalakíthatóak legyenek, szükséges az alacsony kimeneti telítési teljesítményszint. Ez az eszköz félvezetős struktúrájának tervezésével befolyásolható. Az összehasonlító mérések eredményeit mutatják a 3. ábra görbéi, különböző erősítőtípusok és pumpáló áramértékek mellett.

Kioltási tényező vizsgálata

A működés szempontjából legfontosabb jellemző a telítési karakterisztikától is függő kioltási tényező hullámhosszfüggése. A mérés eredménye a 4. ábrán látható.

4. ábra A kioltási tényező hullámhossz függése



A hullámhosszfüggés magyarázata, hogy az erősítésben résztvevő atomi átmenet kiszélesedése véges, és emiatt véges az a hullámhossztartomány is, ahol indukált emisszió létrejöhet. A vizsgált erősítő a maximális kioltási tényezővel az 1575-1585 nm közötti tartományban rendelkezik, ahol a kioltási tényező 30 dB fölé is emelkedik. Ez nyilvánvalóan szoros kapcsolatban van az erősítés hullámhosszfüggésével, amit a félvezetős struktúra kialakításával lehet hatékonyan befolyásolni.

Magának a hullámhosszfüggésének a WDM rendszerekben való alkalmazhatóság szempontjából van szerepe. Elengedhetetlen ugyanis, hogy a majdani hullámhossz konverter berendezéseink a teljes WDM sávban megfelelően működjenek.

Szükséges néhány szót ejteni a működési sebességről, hiszen ez egy nagyon fontos tényező az alkalmazhatóság szempontjából. Az optoelektronikus hullámhosszátalakítók sebessége az elektronikus komponensek miatt, az előrejelzések szerint 40 GHz működési sebesség körül fizikailag korlátozottak. A vizsgált cross-gain moduláció esetén azonban félvezetős optikai erősítőket használunk. Ezeknek az eszközöknek a válaszüzeje a ~ps nagyságrendjébe esik, ami azt jelenti, hogy alkalmazásuk a 100 GHz körüli működési sebességig is lehetséges.

Ha ezen felül figyelembe vesszük, hogy gyakorlati megvalósítás esetén is viszonylag kisszámú komponenssel, egyszerű felépítésű eszközt építhetünk, akkor az ár tekintetében is bizakodóak lehetünk, hogy a technológia fejlődésével a ma még igen drága aktív optikai eszközök árai is elfogadható szintre csökkennek.

Összefoglaló

A félvezetős optikai erősítőket alkalmazó hullámhossz átalakítási módszerek az optikai távközlés gyorsan fejlődő, ígéretes területe. Mint láttuk, számos megközelítés létezik, melyek különböző előnyökkel és hátrányokkal rendelkeznek.

Kiforrott, kereskedelmi forgalomban kapható megoldást napjainkban még csak az optoelektronikus konverterek képviselik, de a növekvő sebességigényeknek hosszútávon csak a tisztán optikai megoldások tehetnek eleget. Hogy végül melyik megoldás lesz a gyakorlatban is befutó, azt a jövő és a piaci igények fogják eldönteni.

Irodalom

- [1] T. Durhuus, B. Mikkelsen, C. Joergensen, S.L. Danielsen and K.E. Stubkjaer: „All-optical wavelength conversion by semiconductor optical amplifier“, IEEE/OSA J.Lightwave Technol., vol.14, pp.942-952, 1996.
- [2] S. J. B. Yoo: „Wavelength conversion technologies for WDM network applications“, IEEE/OSA J.Lightwave Technol., vol.14, pp.955-966, 1996.
- [3] Derek Nasset, Tony Kelly, Dominique Marcenac: „All-Optical Wavelength Conversion Using SOA Nonlinearities“, IEEE Communications Magazine, December 1998, pp. 56-61.,
- [4] A. Carena, M. D. Vaughn, R. Gaudino, M. Shell, Daniel J. Blumenthal: „OPERA: An Optical Packet Experimental Routing Architecture with Label Swapping Capability“, JLT, vol.16, No.12, pp.2135-2145, Dec. 1998.
- [5] S.J.B. Yoo, Hyuek Jae Lee, Zhong Pan, Jing Cao, Yanda Zhang, Katsunari Okamoto, Shin Kamei: „Rapidly Switching All-Optical Packet Routing System With Optical-Label Swapping Incorporating Tunable Wavelength Conversion and a Uniform-Loss Cyclic Frequency AWGR“, PTL, vol.14, No.8, pp.1211-1213, 2002.
- [6] R.G. Broeke, J.J.M. Binsma, M. van Geemert, F. Heinrichsdorff, T. van Dongen, J.H.C. van Zantvoort, E. Tangdiongga, H. de Waardt, X.J.M. Leijtens, Y.S. Oei, M.K. Smit: „An All-Optical Wavelength Converter in a Layer-Stack Suitable for Compact Photonic Integration“, Proceedings Symposium IEEE/LEOS Benelux Chapter, Amsterdam, pp.95-98, 2002.
- [7] J. Leuthold, G. Raybon, Y. Su, R. Essiambre, S. Cabot, J. Jaques, M. Kauer: „40 Gbit/s transmission and cascaded all-optical wavelength conversion over 1 000 000 km“, El. Lett., vol.38, No.16, pp.890-892, Aug. 2002.
- [8] Min-Yong Jeon, Dong Sung Lim, Hak Kyu Lee, Joon Tae Ahn, Do Il Chang, Kyong Hon Kim, Seung Beom Kang: „All-Optical Wavelength Conversion for 20-Gb/s RZ Format Data“, Photonics Technology Letter, vol.12, No.11, IPTLEL (ISSN 1041-1135) pp.1528-1530, Nov. 2000.
- [9] J. Leuthold, C.H. Joyner, B. Mikkelsen, G. Raybon, J.L., Pleumeekers, B.I. Miller, K. Dreyer, C.A. Burrus: „100 Gbit/s all-optical wavelength conversion with integrated SOA delayed-interference configuration“, Electronics Letters, vol.36, No.13, pp.1129-1130, June 2000.
- [10] Y. Liu, M.T. Hill, E. Tangdiongga, H. de Waardt, N. Calabretta, G.D. Khoe, H.J.S. Dorren: „Wavelength Conversion Using Nonlinear Polarization Rotation in a Single Semiconductor Optical Amplifier“, IEEE Photonics Technology Letter, vol.15, No.1, January 2003.