

Broad-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier With Double-Pass Configuration

Seongtaek Hwang, Kwan-Woong Song, Hyung-Jin Kwon, Junho Koh,
Yun-Je Oh, and Kyuman Cho

IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 13, NO. 12, DECEMBER 2001

Abstrak

Pada tulisan ini akan didemonstrasikan sebuah *broad band erbium-doped fiber amplifier (EDFA)* dengan konfigurasi *double-pass*. Penguatan sinyal dan *noise figure* didapatkan lebih dari 24 dB dan kurang dari 6 dB, untuk 1526-1562 nm dan 1569-1605 nm. Penguatan sinyal yang sama didapatkan dengan 53 % daya pompa yang lebih kecil dan panjang *erbium-doped fiber* lebih pendek 45 %, dibandingkan dengan tipe paralel EDFA konvensional. Lebih lanjut, *noise figure* dan *power conversion efficiency* ditingkatkan untuk rentang panjang gelombang.

Pada tulisan

Kata kunci : *Broad band erbium-doped fiber amplifier*, konfigurasi *double pass*, *noise figure*, *power conversion efficiency*.

I. Pendahuluan

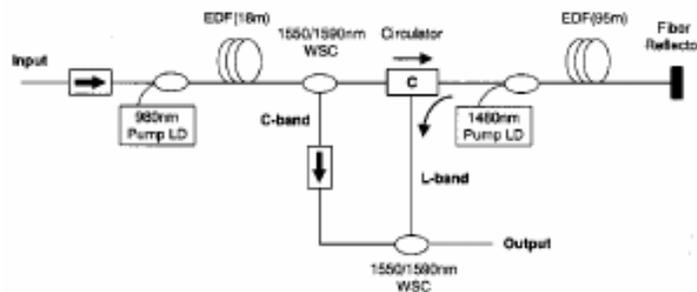
Broad-band fiber amplifier adalah devais utama pada sistem transmisi *wavelength-division-multiplexed (WDM)*. Beberapa metode untuk memperlebar *gain bandwidths* dari *fiber amplifier* telah diajukan. *Raman fiber amplifier* sangat baik untuk memperbesar keseluruhan *bandwidth* transmisi [1], [2], tapi membutuhkan daya pompa yang besar untuk memberikan level penguatan yang dibutuhkan. *Amplifier* menggunakan alternatif *host glasses*, seperti Tellurite[3] dan Fluoride [4] adalah metode lain, tetapi sulit ditangani dalam prakteknya. *Long wavelength band (L-band, 1570–1600 nm) erbium-doped fiber amplifier (EDFA)* dipararel dengan *conventional band (C-band, 1530–1560 nm) EDFA* sangat baik, tapi efesiensinya buruk karena ketidak efisienan dari *L-band EDFA*[5]. Dapat digunakan *amplified spontaneous emission (ASE)* yang tak diinginkan dari *C-band* untuk

meningkatkan penguatan dari *L-Band* EDFA[6]. Beberapa struktur usulan telah diajukan seperti *reflection-type* EDFA dengan *fiber grating* [7], [8] dan *bidirectional type* EDFA [9]. Konfigurasi baru dari *broad-band* EDFA dengan menggunakan *silica-based erbium-doped fiber* (EDF), yang men-*share C-Band* dan *L-Band* telah dilaporkan [10].

Pada tulisan ini, diajukan dan didemonstrasikan sebuah *broad-band* EDFA yang men-*double-passes*-kan sinya *L-Band*, dan mengkombinasikan penguatan *C-Band* dan *L-Band* dalam satu bagian dari EDFA. Sebagai perbandingan, akan diamati juga dua *dual-band* EDFAs dengan konfigurasi yang sama dari [5] dan [10]. *Power conversion efficiency* (PCE) ditingkatkan lebih dari dua kali, dan *noise figure* ditingkatkan sekitar 0,5 dB dibandingkan dengan *parallel type* EDFA untuk 1526–1562 nm and 1569–1605 nm.

II . Eksprimen dan Diskusi

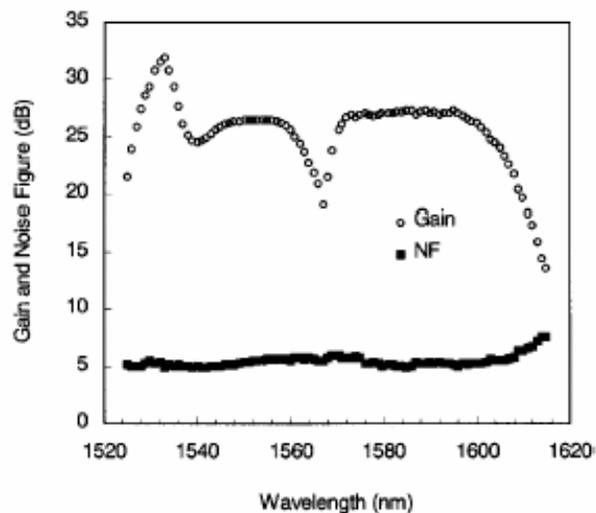
Gambar (1) di bawah ini menunjukkan konfigurasi dari *broad-band* EDFA yang diajukan :



Gambar (1). EDFA dengan konfigurasi *double-pass*

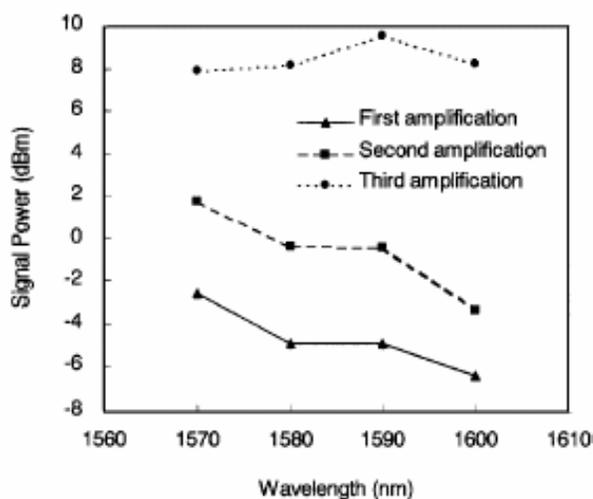
Ada dua tahap penguatan, penguatan pertama adalah untuk penguatan *C-* dan *L-band*, sedangkan penguatan tahap ke-dua hanya untuk penguatan *L-band* amplification. Digunakan *silica-based* EDF dengan panjang 18 dan 95 m untuk tahap pertama dan ke-dua. Pada tahap pertama digunakan *Laser diode* (LD) untuk menciptakan populasi inversi yang besar, mengurangi *noise figure*. Daya pompa 980-nm seluruhnya diserap pada tahap pertama dan tidak bocor dari tahap satu ke tahap ke-dua. Untuk tahap ke-dua digunakan 1480-nm LD sebagai pemompa bertujuan untuk memaksimalkan *conversion efficiency*. Sinyal *C-* dan *L-band* keduanya diumpan ke tahap pertama dari EDFA melalui sebuah

optical isolator. Sebuah 1550/1590-nm *wavelength selective coupler (WSC)* diletakan sesudah tahap pertama dan sinyal *C-band* dari EDFA dihubungkan ke-output melalui *optical isolator* yang ke-dua. *Insertion loss* dan *band isolation* dari 1550/1590-nm WSC adalah 0.7 and 35 dB dan daya *C-band* tidak bocor ke *L-band*. Sinyal *L-band* diumpun ke tahap ke-dua dan dipantulkan untuk dikuatkan kembali oleh penguatan tahap dua dari EDFA. Reflektifitas *fiber-to-fiber* sekitar 93 % dan kebergantungan panjang gelombang dari pemantul diabaikan untuk sinyal *L-band*. Akhirnya sinyal *L-Band* yang telah dikuatkan dihubungkan ke output melalui *circulator* dan kemudian dikombinasikan dengan sinyal *C-band* pada WSC 1550/1590-nm yang ke-dua. Pada konfigurasi ini lintasan *C-band* serupa dengan cara konvensional. *C-band* EDFAs sangat efisien walaupun dalam konfigurasi yang sederhana. Pada sisi lain efisiensi dari *L-band* sangat buruk, tapi konfigurasi *double-passed* pada tahap ke-dua memperbaiki efisiensi yang buruk ini. EDFA dikarakteristikan dengan daya total sinyal input -12 dBm terdistribusi secara merata sepanjang empat *C-band* dan empat *L-band wavelength channels* (-21 dBm untuk masing masing saluran). Panjang gelombang sinyal dipisahkan sejauh 10 nm antara 1530 dan 1600. Kemudian diukur penguatan sinyal dan *noise figure* dengan metode *probe beam*. Prober beam disapu dari 1525 sampai 1605 dengan daya -40 dBm. Gambar (2) menunjukkan karakteristik penguatan dari *double-pass broad-band EDFA*, diukur dengan *probe beam*.



Gambar (2). Karakteristik penguatan dari *double-pass* EDFA

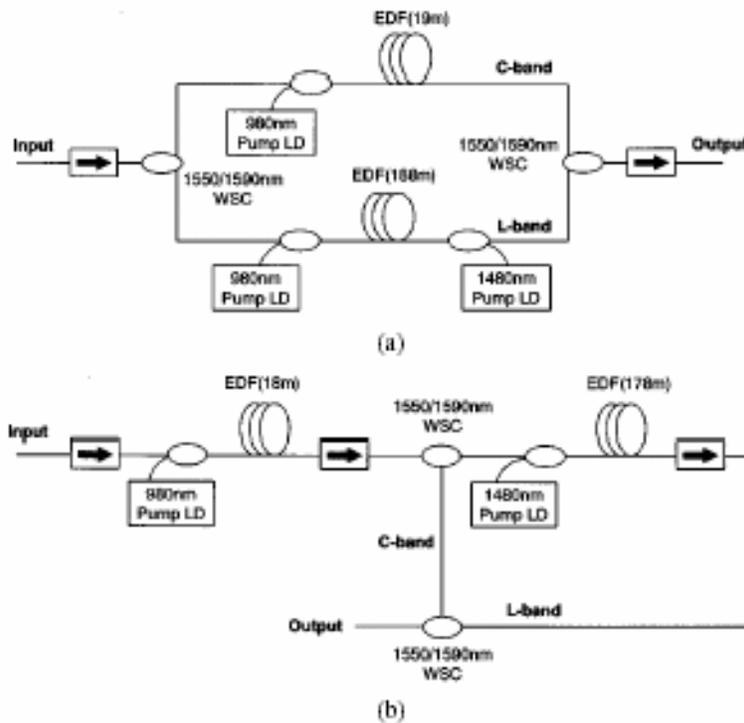
Didapatkan penguatan yang tinggi (≥ 24 dB) dan *noise figure* yang rendah (< 6 dB) untuk *C-band* (1526–1562 nm) dan *L-band* (1569–1605 nm) pada waktu yang sama, dimana daya total yang diumpankan hanya 153 mW. Kontras dengan penguatan *L-band*, penguatan *C-band* tidak secara intrinsik datar. Sebuah gain-flattening filter (GFF) diperlukan untuk membuat datar penguatan *C-band*, misalnya diletakan dekat ouput isolator. Ketika penguatan *L-band* lebih tinggi daripada *C-band*, sedikit modifikasi diri daya pemompa dan panjang segmen EDF dapat meningkatkan penguatan *C-band*. Sebagai alternatif sinyal *L-band* dapat dilemahkan pada *ouput amplifier*. Lebih jauh lagi, daya sinyal keluaran dapat ditingkatkan menggunakan tambahan LD pemompa pada penguat pertama dan ke-dua. Gambar (3) menunjukkan daya *L-band* diukur pada output dari masing-masing tahap penguatan.



Gambar (3). Daya dari sinyal *L-band* pada *double-pass* EDFA

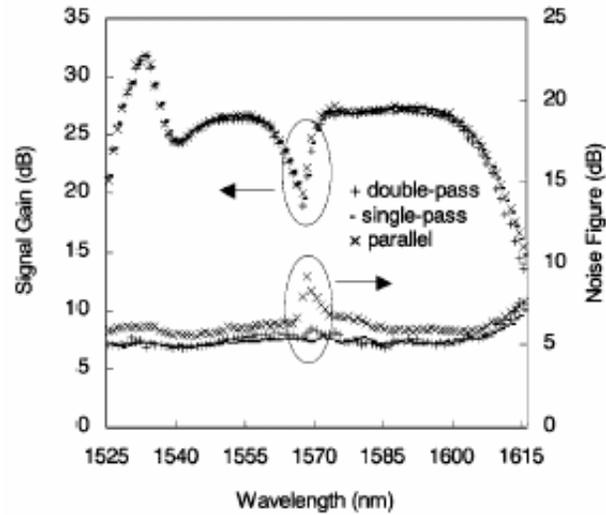
Daya yang tinggi (85 mW) dari pemompa 980-nm menciptakan populasi inversi yang tinggi pada tahap pertama. Ini akan membantu secara kuat penguatan panjang gelombang pendek, menghasilkan *gain tilt* yang tinggi pada tahap pertama. Untuk tahap ke-dua, daya pemompa yang diinjeksikan adalah 68 mW, dimana cukup kuat untuk menciptakan penguatan ke seluruh *L-band* pada tahap ke-dua. *Gain tilt* sesudah satu lintasan (*single-pass*) tidak berubah. Tetapi setelah refleksi, sinyal *L-band* dikuatkan kembali di dalam arah yang berlawanan. Akan ada *gain tilt* yang kuat, yang mengkompensasi *tilt* pada tahap pertama dan *second stage single passed* untuk menciptakan distribusi daya yang mendekati datar sesudah tahap ke-dua dilakukan *double passed*.

Sebagai perbandingan, dikarakteristikan juga dua *dual-band EDFAs*. Satu adalah sinyal *C-band* dan *L-band* dikuatkan secara paralel dengan EDFs yang berbeda, lihat gambar (4.a).



Gambar (4). Konfigurasi EDFA. (a) Tipe paralel. (b) Tipe *single pass*

Yang lain adalah *C-band* dan *L-band* dikuatkan pada tahap pertama dan pada tahap dua hanya sinyal *L-band* yang dikuatkan dengan sinyal *L-band* sekali dilewatkan (*single pass*) (lihat gambar (4.b)). Keduanya didesain untuk mendapatkan penguatan sinyal seperti pada *double pass EDFA* pada gambar (1). Daya yang diumpan untuk EDFA tipe paralel adalah 90 mW pada 980 nm untuk tahap penguatan *C-band*, dan 234 mW (180 mW pada 980 nm dan 54 mW pada 1480 nm) untuk tahap *L-band*. Daya pemompa yang diumpankan pada *single-pass EDFA* adalah 85 mW pada 980 nm untuk tahap pertama dan 111 mW pada 1480 nm untuk tahap ke-dua. Gambar (5) menunjukkan perbandingan dari karakteristik penguatan untuk 3 konfigurasi EDFAs. Spektrum penguatan sangat serupa *Noise figure* untuk *double-pass EDFA* diperbaiki sekitar 0.5 dB daripada *parallel EDFA*, dan sama untuk *single-pass EDFA*. *Noise figure* yang lebih baik dari *double-pass* and *single-pass EDFA* disebabkan penempatan 1550/1590-nm WSC pada pertengahan tahapan penguatan dan mengurangi loss awal.



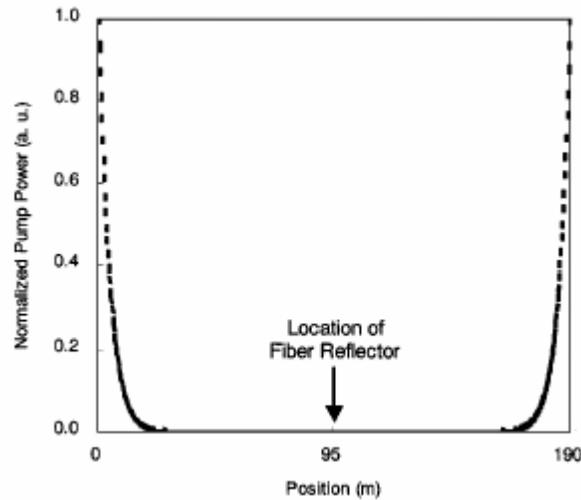
Gambar (5). Perbandingan karakteristik penguatan pada parallel, single-pass dan double-pass EDFAs

Tabel I membandingkan total daya pemompa, total panjang EDF dan hasil *power conversion efficiency* yang didapatkan dengan *doublepass*, *single-pass*, dan *parallel-type EDFAs*.

TABLE I
COMPARISON OF PARALLEL, SINGLE-PASS AND DOUBLE-PASS EDFAS

Structure	Pump power (mW)	EDF length (m)	PCE (%)
Parallel type	324	207	9.2
Single pass type	196	196	15.1
Double pass type	153	113	20.5

Double-pass EDFA mencapai penguatan yang sama dan *noise figure* yang lebih baik daripada parallel EDFA dengan daya pemompa 53% lebih rendah dan panjang EDF 45% lebih pendek. *Double-pass EDFA* mencapai gain dan *noise figure* yang sama dengan *single-pass EDFA* tapi daya pemompa lebih rendah 22% and panjang EDF 42% lebih pendek. PCE bertambah dari 9.2% pada *parallel EDFA* dan 15.1% pada *single-pass EDFA* menjadi 20.5% pada *double-pass EDFA*. Panjang EDF dapat dibuat lebih pendek dengan menggunakan *fiber reflector*. Gambar (6) menunjukkan normalisasi daya pemompa pada tahap ke-dua disimulasikan untuk *Double-pass EDFA*.



Gambar (6). Normalisasi daya pompa untuk double-pass EDFA pada tahap ke-dua

Daya pemompa untuk *double-pass EDFA* tertinggi pada *input end* dari EDF kemudian berkurang secara gradual ketika melewati segemn EDF menuju *fiber relector*. Sinyal *input end* dari EDF adalah sinyal *output-end* pada saat yang sama pada konfigurasi *double-pass*. *Double-pass* EDFA lebih efisien daripada konfigurasi *single-pass* karena konfigurasi pemompaan memiliki efek yang sama seperti pemompaan *bidirectional*. Maka, didapatkan PCE yang lebih tinggi pada *double-pass* EDFA daripada *single-pass* EDFA.

III. Kesimpulan

Telah diajukan dan didemonstrasikan sebuah *broad-band EDFA* dengan konfigurasi *double pass*. Tahap pertama dari EDFA mengkombinasikan penguatan *C* dan *L-band*, sementara tahap ke-dua hanya menguatkan sinyal *L-band*. Lebih lanjut, sinyal *L-band* di-*double passed* melalui tahap ke-dua. Dengan menggunakan metode ini, daya pompa yang dibutuhkan dan panjang EDF dapat dikurangi sebesar 22 – 53 % sehingga dapat menghemat biaya untuk sistem transmisi wide-band WDM.

III. Referensi

- [1] Y. Emori, S.-i. Matsushita, and S. Namiki, "1-THz-spaced multi-wavelength pumping for broadband Raman amplifiers," in *Proc. Eur. Conf. Optical Communications*, 2000, Paper 4.4.2.
- [2] H. Masuda and S. Kawai, "Wide-band and gain-flattened hybrid fiber amplifier consisting of an EDFA and a multiwavelength pumped Raman amplifier," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 647–649, June 1999.
- [3] M. Yamada, A. Mori, K. Kobayashi, H. Ono, T. Kanamori, K. Oikawa, Y. Nishida, and Y. Ohishi, "Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76nm," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 1244–1246, Sept. 1998.
- [4] H. Masuda, S. Kawai, and K. Aida, "Wideband erbium-doped fiber amplifiers with three-stage amplification," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp. 567–568, 1998.
- [5] M. Yamada, H. Ono, T. Kanamori, S. Sudo, and Y. Ohishi, "Broadband and gain-flattened amplifier composed of a 1.55_μm-band and a 1.58_μm-band Er -doped fiber amplifier in a parallel configuration," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 710–711, 1997.
- [6] B. Min, H. Yoon, W. J. Lee, and N. Park, "Coupled structure for wide-band EDFA with gain and noise figure improvements from C to L-band ASE injection," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 480–482, May 2000.
- [7] Y. Sun, J.W. Sulhoff, A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, T. A. Strasser, J. R. Pedrazzani, C. Wolf, J. Zhou, J. B. Judkins, R. P. Espindola, and A. M. Vengsarkar, "80nm ultra-wideband erbium-doped silica fiber amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 1965–1967, 1997.
- [8] I. Yamashita, K. Shimoura, S. Seikai, and T. Fukuoka, "Er doped fiber amplifier operating at wavelengths of 1.55 and 1.60_μm," *Electron. Lett.*, vol. 32, pp. 1102–1103, 1996.
- [9] M. A. Mahdi, F. R. M. Adikan, P. Poopalan, S. Selvakennedy, and H. Ahmad, "High-gain bidirectional Er -doped fiber amplifier for conventional- and long-wavelength bands," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, pp. 1468–1470, Nov. 2000.
- [10] D. Lowe, R. Di Muro, and S. Wilson, "75nm of continuous gain using a novel EDFA topology," in *Proc. Eur. Conf. Optical Communications*, 2000, Paper 6.4.1.