

비대칭 구조의 커플러를 이용한 EDFA 이득평탄필터 설계

조준용 · 이경식[†]

성균관대학교 정보통신공학부 광통신연구실

Ⓣ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300

(2002년 8월 16일 받음, 2002년 9월 30일 수정본 받음)

비대칭 구조의 커플러에 대한 이론적 고찰과 함께 EDFA 이득평탄용 필터로서의 응용과 그에 대한 설계를 하였다. 이득평탄필터를 구현하기 위한 비대칭 커플러의 광섬유 파라미터를 제시하였고 커플러의 광 결합 길이와 코어간의 거리에 따른 이득평탄필터의 투과 스펙트럼의 특성을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 그리고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 하여 약 30 nm의 대역폭에 걸쳐서 EDFA의 이득 스펙트럼을 ± 0.75 dB이하로 평탄화할 수 있는 이득평탄필터를 설계하였다.

주제어 : Asymmetrical directional coupler, EDFA, Gain flattening filter (GFF).

I. 서 론

어븀이 첨가된 광섬유(EDF: Erbium Doped Fiber)를 이용한 광섬유 증폭기의 기술은 WDM(Wavelength Division Multiplexing)을 기반으로 하는 최근 광통신 망에서 채널의 확장성과 장거리 전송을 위해 반드시 필요한 기술중의 하나이다. 그러나 EDFA의 경우, 입력 신호의 증폭률이 파장에 따라 서로 다르게 나타나기 때문에 평탄한 이득 스펙트럼을 얻기 위해서는 별도의 이득평탄필터가 반드시 필요하다. 현재 가장 많이 사용되는 이득평탄필터로는 박막필터^[1,2]와 광섬유격자를 이용한 필터가 있는데, 광섬유격자를 이용한 이득평탄필터에는 장주기 광섬유격자^[3,4]와 단주기 광섬유격자^[5]를 이용한 필터가 사용되고 있다. 박막필터는 널리 사용되고 있는 방법으로, 성능은 뛰어나지만 광섬유격자 필터에 비해 삽입손실이 크고 제작공정이 복잡하다는 단점이 있다. 반면에 광섬유격자를 이용한 필터는 광섬유에 직접 격자를 삽입시키기 때문에 박막필터에 비해 삽입손실이 적다는 장점을 가지고 있지만 장주기 광섬유격자를 이용할 경우, 온도에 따른 이득평탄 스펙트럼의 변화가 심하다는 단점이 있고 단주기 광섬유격자는 반사광으로 인한 케환 잡음이 발생하기 때문에 별도로 아이솔레이터 등이 필요하다는 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 기존의 이득평탄필터의 문제점들을 해결하기 위해 비대칭 구조의 커플러를 이용한 이득평탄필터의 구현 방법을 처음으로 제안하였으며, 그 특성을 시뮬레이션을 통해서 분석해 보았다. 본 논문에서 제안하는 이득평탄필터는 특정 파장 대역에서만 광 결합을 일으키는 비대칭 구조의 커플러를 이용하고 입력단으로 반사되는 케환 잡음이 매우 적다는 것을 특징으로 한다. 또한 일반적으로 광섬유 커플러가 광섬유격자에 비해 온도 특성이 우수한 것으로 알려져 있어서 실제 구현에 있어서도 우수한 온도 특성을 보일 것으로 기대된다.

II장에서는 비대칭 커플러의 구조 및 동작원리에 대해 설명하고 특정 파장에서만 광 결합을 일으키기 위한 광섬유 파라미터들을 설계하였다. 그리고 III장에서는 커플러의 파라미터에 따른 투과 스펙트럼의 특성과 비대칭 커플러를 이용해 EDFA의 이득평탄필터를 설계하고 그 성능을 이론적으로 분석하였다.

II. 비대칭 커플러의 구조 및 동작원리

본 장에서는 비대칭 커플러의 구조와 그 동작원리에 대해서 간단히 살펴보도록 하겠다. 그림 1은 두 개의 서로 다른 광섬유로 구성된 비대칭 커플러의 구조를 나타내고 있다. 여기서, 비대칭이란 커플러를 구성하는 두 광섬유의 굴절률(n)과 코어의 반지름(r)이 서로 다른 것으로, 커플러를 구성하는 광섬유의 파라미터들은 광 결합이 일어나는 특정 파장의 설계에 따라 결정되어진다. 일반적으로 서로 다른 광섬유를 이용해 커플러를 구성할 경우, 광섬유들간의 전파상수(β)가 서로 다르기 때문에 광 결합(phase matching)이 발생하지 않는다. 그러나

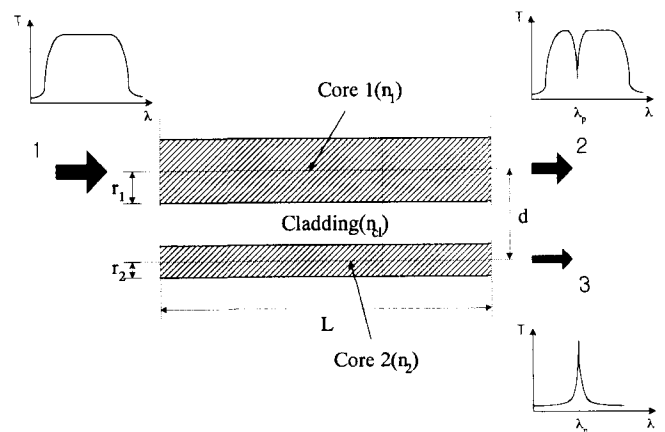


그림 1. 비대칭 커플러의 구조 및 동작원리.

[†]E-mail: kslee@skku.ac.kr

특정 파장 대역에서만 전파상수가 일치하도록 두 광섬유의 파라미터들을 설계해주면 일정 영역의 파장대에서만 광 결합이 가능하게 된다.¹⁶⁾

수식 1은 비대칭 커플러를 구성하는 두 광섬유들간의 전파상수(β_1, β_2)의 차를 $\Delta\beta$ 로 정의한 것으로, 여기서, β_1 은 그림 1에서 입력단이 존재하는 제 1 광섬유의 전파상수를 나타내고 β_2 는 제 1 광섬유에 인접한 제 2 광섬유의 전파상수를 나타낸다.

$$\Delta\beta = \beta_1(\lambda_p) - \beta_2(\lambda_p) \quad (1)$$

수식 1과 그림 1을 참고하여 비대칭 커플러의 동작원리를 살펴보면, 제 1 광섬유의 입력단(1)으로 입사된 다 파장의 광 신호는 제 1 광섬유의 코어 내를 도파하다가 이 중 수식 1에서 $\Delta\beta = 0$ 의 조건을 만족하는 파장(λ_p)만이 제 1 광섬유에 인접한 제 2 광섬유로 광 결합되어 제 2 광섬유의 출력단(3)으로 추출되고 광 결합하지 않은 나머지 파장들은 제 1 광섬유의 출력단(2)으로 출력된다. 본 연구에서의 비대칭 커플러를 이용한 EDFA 이득평탄필터의 설계는 제 1 광섬유의 출력단(2)에서 관측되는 λ_p 근처의 결합 손실을 이용하여 EDFA의 이득 스펙트럼을 평탄화하는 것이다.

비대칭 커플러를 이용해 EDFA의 이득평탄필터를 구현하기 위해서는 먼저, 비대칭 커플러를 구성하는 광섬유들의 파라미터들이 설계되어야 한다. 앞에서 언급되었듯이 광섬유 파라미터들은 광 결합이 일어나는 파장에 따라 그 값들이 결정되는데, 좀더 자세한 설명을 위해 수식 1에 $\beta_{1,2} = \{(kn_{cl})^2 + (\omega_{1,2}/r_{1,2})^2\}^{1/2}$ 의 관계식을 대입하여 정리하면 아래와 같다.¹⁷⁾

$$\begin{aligned} &\sqrt{2} \times 1.1428k r_1 r_2 \{ \sqrt{n_1(n_1 - n_{cl})} \sqrt{n_2(n_2 - n_{cl})} \} \\ &+ 0.996(r_1 - r_2) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\omega_1 = 1.1428 V_1 - 0.996$ 이며, $r_{1,2}$ 는 제 1 및 제 2 광섬유의 코어 반경, V_i 는 정규화 주파수(normalized frequency)이며 $k = 2\pi/\lambda$ 이다. 수식 2에 광 결합이 일어나는 파장(λ_p)과 제 1 광섬유(또는 제 2 광섬유)의 파라미터들을 대입하면 제 2 광섬유(또는 제 1 광섬유)의 파라미터들을 쉽게 얻을 수 있다.

그림 2(a)는 수식 2를 이용해 1.53 μm 근처에서 광 결합이 발생하도록 비대칭 커플러를 설계한 것으로, $\Delta\beta$ 의 값이 1.53 μm 에서만 0인 것을 볼 수 있다. 이때, 시뮬레이션에 사용된 제 1 광섬유의 r_1 과 코어의 굴절률 n_1 은 각각 4 μm 와 1.4484로 가정하였고, 제 2 광섬유의 r_2 와 코어 굴절률 n_2 는 각각 1.5 μm 와 1.4579이었다. 그림 2(b)는 그림 2(a)의 조건으로 설계된 비대칭 커플러의 투과 스펙트럼을 결합모드이론(coupled mode theory)을 이용해 시뮬레이션한 것으로, 1.53 μm 를 중심으로 일정대역에서 광 결합이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이때, 광 결합이 일어나는 두 원형 코어사이의 결합계수(cross coupling coefficient)는 eigenvalue 방정식과 Bessel 함수를 이용해 계산하였으며, 두 광섬유의 코어간의 거리(d)는 20 μm 이었고 광 결합 길이(L)는 20 mm로 가정하였다. 일반적으로, 비대칭 커플러에서 $\Delta\beta$ 의 기울기는 두 광섬유의 비대칭율을 나타내기도 하는데, 기울기가 클수록 두 광섬유간의 코어나 굴절률의 차이가 큰 것을 의미한다. 또한 $\Delta\beta$ 의 기울기는 투과

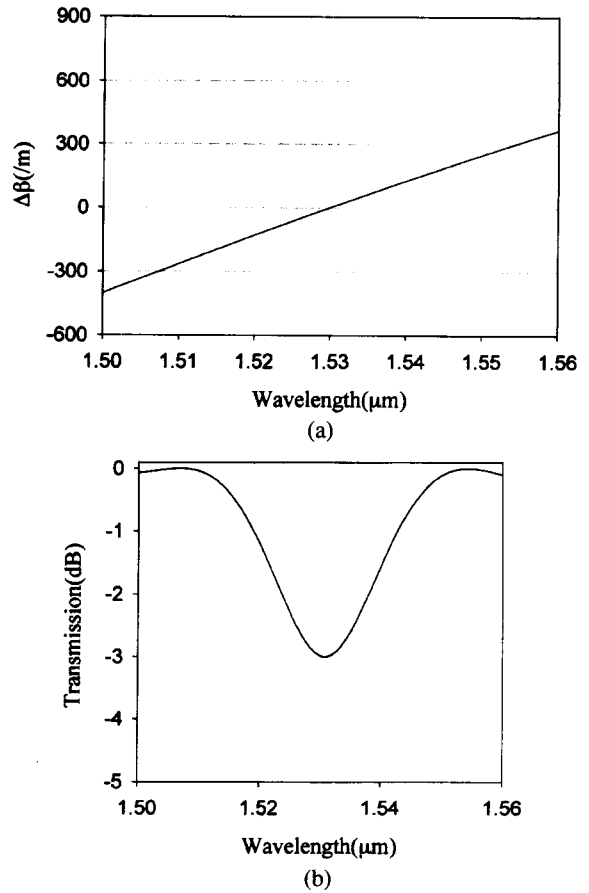


그림 2. 1.53 μm 에서 설계된 비대칭 커플러 : (a) 분산 기울기 및 (b) 투과 스펙트럼.

스펙트럼의 대역폭에 영향을 주기 때문에 원하는 대역폭을 갖는 필터를 설계하기 위해서는 적당한 $\Delta\beta$ 의 기울기 값을 갖도록 비대칭 커플러가 설계되어야 한다.

III. 파라미터에 따른 투과 스펙트럼 특성 및 EDFA 이득평탄필터 설계

비대칭 커플러의 투과 스펙트럼에 영향을 주는 파라미터들은 크게 커플러를 구성하는 두 광섬유의 자체 파라미터와 광섬유 코어간의 거리(d) 그리고 광 결합 길이(L) 등으로 나눌 수 있다. 광 결합이 일어나는 파장은 두 광섬유의 파라미터(반지름, 굴절률)들을 조정하여 그 값을 얻을 수 있으며, 광 결합에 기인한 손실 피크의 크기와 손실 대역폭은 광섬유 코어간의 거리(d)와 광 결합 길이(L)를 조정함으로써 쉽게 설계될 수 있다. 시뮬레이션에 앞서, 두 광섬유의 코어 반지름(r_1, r_2)과 굴절률(n_1, n_2)은 1.53 μm 의 파장 대역에서 광 결합이 일어나도록 그림 2에서와 같은 동일한 조건으로 가정하였다. 그리고 본 절에서는 광섬유 코어간의 거리(d)와 광 결합 길이(L)에 따른 비대칭 커플러의 투과 스펙트럼 특성을 분석하고 이를 바탕으로 비대칭 커플러를 이용한 EDFA의 이득평탄필터를 설계할 것이다.

그림 3은 두 코어간의 거리(d) 변화에 따른 이득평탄필터의

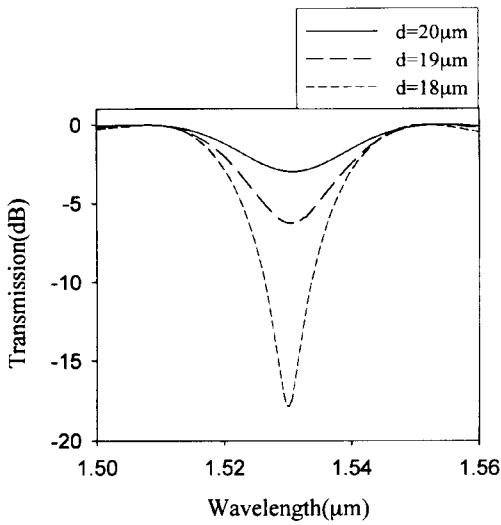


그림 3. 코어간의 거리 변화에 따른 이득평탄필터의 투과 스펙트럼 (— : $d=20\ \mu\text{m}$, -- : $d=19\ \mu\text{m}$, -·- : $d=18\ \mu\text{m}$).

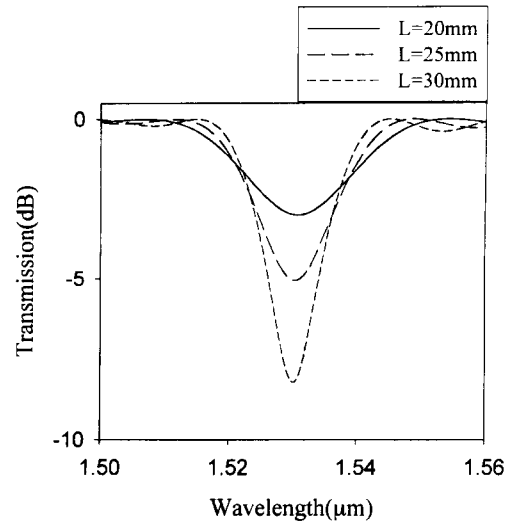


그림 4. 광 결합 길이에 따른 이득평탄필터의 투과 스펙트럼 (— : $L=20\ \text{mm}$, -- : $L=25\ \text{mm}$, -·- : $L=30\ \text{mm}$).

투과 스펙트럼을 나타낸 것이다. 코어간의 거리(d)는 $20\ \mu\text{m}$ 에서 $18\ \mu\text{m}$ 까지 $1\ \mu\text{m}$ 간격으로 변화시키면서 그 특성을 살펴 보았으며, 이때, 광 결합 길이(L)는 $20\ \text{mm}$ 로 가정하였다. 광 결합을 일으키는 두 코어간의 거리는 광 결합 세기와 관계되기 때문에 코어간의 거리가 증가 또는 감소하게 되면 광 결합에 의한 손실 피크의 크기가 변화하게 된다. 따라서 두 코어간의 거리를 적절히 설계함으로써 EDFA의 이득 스펙트럼을 평탄화할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 3에서도 볼 수 있듯이 손실 피크의 크기는 광섬유 코어간의 거리 변화에 민감하게 반응하기 때문에 EDFA의 이득평탄필터를 설계하거나 제작하는데 있어서는 주의를 기울여야 한다. 그림 4에는 광 결합 길이(L) 변화에 따른 손실 대역폭의 특성을 나타내었다. 두 코어간의 거리(d)는 $20\ \mu\text{m}$ 로 가정하였으며, 광 결합 길이는 각각 $20\ \text{mm}$, $25\ \text{mm}$, 그리고 $30\ \text{mm}$ 로 가정하였다. 광 결합 길이가 증가할수록 손실 대역폭의 크기는 점차적으로 감소하는 것을 볼 수 있으며, 동시에 손실 피크의 크기도 조금씩 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 광 결합 길이(L) 변화에 대한 손실 대역폭의 변화가 작기 때문에 $1\ \text{nm}$ 이하의 아주 좁은 손실 대역폭을 얻기 위해서는 광 결합 길이의 증가와 함께 두 광섬유의 비대칭율($\Delta\beta$ 의 기울기)을 크게 해주어야 한다.

위의 시뮬레이션 결과들을 바탕으로 비대칭 구조의 커플러를 이용한 EDFA의 이득평탄필터를 설계하였다. 본 연구에서의 이득평탄은 한 개의 비대칭 커플러를 이용하여 이득 스펙트럼 상에서 $1.53\ \mu\text{m}$ 근처의 이득을 평탄화하는 것을 가정하였다. 비대칭 커플러를 구성하는 두 광섬유의 파라미터는 $1.53\ \mu\text{m}$ 에서 광 결합(손실 피크)이 발생하도록 제 1 광섬유와 제 2 광섬유의 코어 반지름은 $4\ \mu\text{m}$ 와 $1.5\ \mu\text{m}$ 로 하였고 굴절률은 각각 1.4484 와 1.4579 로 설계하였다. 이때, 두 광섬유간의 비대칭율($\Delta\beta$ 의 기울기)은 $\sim 12/(\text{m} \cdot \text{nm})$ 이었다. 이득평탄필터의 손실 피크의 크기와 대역폭은 그림 3과 그림 4의 시뮬레이션 결과를 바탕으로, 코어간의 거리와 광 결합 길이를 조정하여 설계하였으며, 이때, 광 결합 길이는 이득평탄필터의 대역폭이

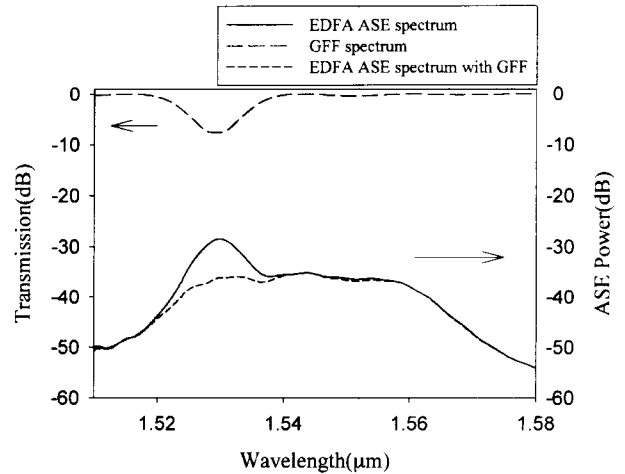


그림 5. 설계된 이득평탄필터를 이용한 EDFA의 이득 스펙트럼 평탄화 (— : EDFA의 ASE 스펙트럼, -- : 이득평탄필터의 투과 스펙트럼, -·- : 이득 평탄화된 EDFA의 예상 스펙트럼).

약 $10\ \text{nm}$ 가 되도록 $32\ \text{mm}$ 로 하였으며, 두 코어간의 거리는 $20.3\ \mu\text{m}$ 하여 손실 피크의 크기가 약 $7\ \text{dB}$ 가 되도록 설계하였다. 그림 5에 EDFA의 ASE 스펙트럼(solid: —)과 비대칭 커플러를 이용한 이득평탄필터의 투과 스펙트럼(long dashed: —) 그리고 설계된 이득평탄필터를 사용하였을 때, 예상되는 평탄화된 ASE 스펙트럼(short dashed: --)을 시뮬레이션 하여 나타내었다. 이때, 이득평탄필터의 삽입손실은 없다고 가정하였다. 그림 5의 시뮬레이션 결과를 보면, 위의 조건으로 설계된 이득평탄필터를 이득 평탄도(flatness)가 $7\ \text{dB}$ 인 EDFA에 사용할 경우, 약 $30\ \text{nm}(1.53\ \mu\text{m}\sim 1.56\ \mu\text{m})$ 의 대역폭에 걸쳐서 $\pm 0.75\ \text{dB}$ 까지 평탄도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 최초로 비대칭 커플러를 이용해 이득평탄화

할 수 있는 EDFA용 필터를 제안하였다. 서로 다른 두 개의 광섬유로 구성된 비대칭 커플러를 이론적으로 고찰하였고 설계 파라미터에 따른 투과 스펙트럼의 특성도 살펴보았다. 그리고 이를 바탕으로 EDFA의 이득평탄필터를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 특정 파장에서만 광 결합이 가능하도록 광섬유의 파라미터를 설계하여 그 값을 제시하였으며, 광섬유 코어간의 거리와 광 결합 길이가 광 결합에 의해 발생하는 손실 피크의 크기와 손실 대역폭에 관계됨을 보였다. 또한 분석된 결과를 바탕으로, 비대칭 커플러를 이용해 EDFA의 이득평탄필터를 설계하였으며, 설계된 이득평탄필터의 성능을 시뮬레이션을 통해 이론적으로 분석해 보았다. 설계된 이득평탄필터를 이득 평탄도가 약 7 dB인 EDFA에 사용할 경우, 약 30 nm 대역에 걸쳐서 ± 0.75 dB까지 평탄도를 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00251)지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] C. K. Carniglia, "Design of thin-film interference filters for

telecommunications applications," *Optical Fiber Communication Conference, 2000*, vol. 2, pp. 93, 2000.

[2] W. K. Chan and D. R. Andersen, "A passive and adaptive optical equalizer for reconfigurable multiwavelength networks," *Lasers and Electro-Optics, 2000 (CLEO 2000)*, pp. 574, 2000.

[3] P. F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola, M. Andrejco, and A. M. Vengsarkar, "Broad-band erbium-doped fiber amplifier flattened beyond 40 nm using long-period grating filter," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, pp. 1343-1345, 1997.

[4] M. K. Pandit, K. S. Chiang, Z. H. Chen, and S. P. Li, "Tunable long period fiber gratings for EDFA gain and ASE equalization," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 25, pp. 181-184, 1999.

[5] S. K. Liaw, K. P. Ho, and S. Chi, "Dynamic power-equalized EDFA module based on strain tunable fiber Bragg gratings," *IEEE Photon. Technol. Lett.* vol. 11, pp. 797-799, 1999.

[6] R. Zengerle and O. G. Leminger, "Wavelength-Selective Directional Coupler Made of Nonidentical Single-Mode Fibers," *Journal of Lightwave Tech.*, vol. LT-4, no. 7, pp. 823-827, 1986

[7] A. W. Snyder and A. Ankiewicz, "Optical Fiber Couplers-Optimum Solution for Unequal Cores," *Journal of Lightwave Tech.*, vol. 6, no. 3, pp. 463-474, 1988.

The design of the EDFA gain flattening filter using an asymmetrical directional coupler

Joon Yong Cho and Kyung Shik Lee[†]

School of Information and Communications Engineering, SungKyunKwan University, Kyungki-Do 440-746, KOREA

[†]E-mail: kslee@skku.ac.kr

(Received August 16, 2002 ; Revised manuscript received September 30, 2002)

An asymmetrical directional coupler with two nonidentical fibers has, for the first time, been proposed and analyzed for an EDFA gain flattening filter (GFF). The characteristics of the transmission spectra of the GFFs have been theoretically investigated for the core spacings, the coupling lengths and the fiber parameters of the asymmetrical directional coupler. The analytical results show that an EDFA gain spectrum with flatness of ~ 7 dB can be flattened to within ± 0.75 dB over a bandwidth of 30 nm by using the asymmetrical directional coupler-based GFF.

Classification code : FO.010.