

## 광섬유 통신의 현황과 전망

申相永\*, 尹台焄\*\*

韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科  
教授(工博)\* 博士課程\*\*

### I. 序 論

레이저의 發明과 함께, 1960年代 初부터 光通信이 廣帶域 信號 傳送을 위한 方法으로써 연구되기 시작하였다. 1970年代에 들어서면서 20dB/km의 低損失 광섬유와 常溫에서 連續發振하는 반도체 레이저의 개발은 광섬유 통신의 실용화를 가능하게 한 전환점이 되었다. 작년(1983) 9月 美國의 Bell연구소에서는 새로 개발된 Cleaved-Coupled-Cavity (C<sup>3</sup>) 單一 周波數 레이저(single frequency laser)에 의해 1초당 420 M bit을 광섬유를 통해 증계기 없이 161.5km 떨어진 곳에 傳送하는 데 성공하여, 광섬유 통신 기술의 화려한 미래를 예고하였다. 이에 의하면, 백과사전 Encyclopedia Britanica 30권 전부를 서울에서 大田까지 1초 이내에 傳送할 수 있다.

광섬유는 기존 전화통신망 뿐만 아니라, 정보 전송 용량이 크므로 케이블 TV, 비디오전송, 비디오전화, 데이터전송, 컴퓨터통신, 大都市 大容量 電話網 등의 大容量 通信網에, 損失이 작으므로 海低의 長距離 通信등에 실용화될 전망이다. 최근에는 태평양 및 대서양을 횡단하는 해저 광섬유 케이블을 가설하기 위한 계획도 추진중에 있다. 초기에는 일찍부터 연구한 GaAlAs 반도체 레이저의 파장영역이면서 광섬유 손실도 비교적 작은 0.8~0.9 $\mu$ m의 短波長 領域에서, 다중 모드 광섬유를 이용한 전송 시스템이 주로 연구되었으며, 이러한 방식에 의한 시스템이 현재 널리 사용되고 있다. 그러나, 광섬유 손실이 장파장영역(1.1~1.7 $\mu$ m)에서 궁극적으로 작기 때문에, 반도체 레이저도 이 영역의 파장의 빛을 내는 InGaAsP 레이저의 제조 기술을 급속히 발전시켜 왔으며, 일차적으로 1.3 $\mu$ m 영역의 광섬유 시스템이 실용화하고 있다. 또한 모드분산이 없이 色分散만 있어 대용량 장거리 전송에 유리한 單一 모드 광섬유를 집중적으로 연구하여 왔다. 최근에는 單一 周波數 레이저의 출현으로 색분산 문

제가 실질적으로 없어짐에 따라 손실이 가장 작은 1.55 $\mu$ m(0.16dB/km) 근방에서의 單一 모드 광섬유를 통한 전송이 앞으로 유력하게 되었다.

### II. 광섬유와 광통신 시스템의 變遷

현재의 광섬유 통신 시스템은 디지털 정보가 전송될 수 있는 거리와 정보 전송속도에 제한을 받는다. 이러한 제한은 광섬유내에서 신호가 감쇠되고, 두 종류의 分散(모드分散과 色分散)에 의해 光펄스의 펄스 폭이 넓어지기 때문에 생긴다.<sup>(4,5)</sup> 현재 널리 사용되고 있는 광섬유 통신 시스템은 다중 모드 광섬유를 사용한다. 다중 모드 광섬유에서는 진행속도가 각기 다른 여러 모드가 한꺼번에 진행하게 된다. 따라서, 광섬유내에서의 진행거리가 길어지게 되면, 처음에는 작았던 펄스의 폭이, 모드에 따른 遲延時間의 차이가 커지므로, 점차 커지게 된다. 이를 모드분산(modal dispersion)이라 한다. 또, 레이저 다이오드나 發光다이오드(LED)에서 나오는 빛이 약간의 파장폭을 가지며, 파장이 다른 빛은 광섬유내에서 다른 속도로 진행하게 된다. 이 역시 펄스폭을 커지게 하며, 이를 色分散(chromatic dispersion)이라 한다. 그런데, 色分散을 편이상 재료분산과 도파로 분산으로 구분하기도 한다. 재료분산은 광섬유의 재료인 유리의 굴절률이 파장에 따라 약간씩 변하기 때문에 생기며, 도파로 분산은 광섬유의 기하학적 구조에 의해서 나타나게 된다.

현재 널리 사용되고 있는 다중 모드 광섬유 통신 시스템은 GaAlAs LED나 레이저 다이오드를 주로 사용한다. 이들은 0.8~0.9 $\mu$ m의 파장에서 동작하며, 비교적 단거리 통신에 적당하다. 이 시스템은 신호가 전송될 수 있는 거리와 정보 전송용량의 제한이 크다. 이 파장에서 광섬유내의 신호는 매 km마다 약 2dB 감쇠하며, 다중 모드 광섬유를 사용하는 경우 분산이 주로 모드 분산에 의해 좌우되며 색분산만 있는 단일 모

드 광섬유에 비해 크다. 따라서, 매 10~15km마다 증계기가 설치되어야 한다.

1.3 $\mu\text{m}$ 에서 동작하는 GaAsInP LED나 레이저 다이오드의 출현은 증계기 간격을 증가시킬 수 있게 하였다. 0.8~0.9 $\mu\text{m}$ 영역에 비해 1.3 $\mu\text{m}$ 영역에서의 광섬유를 통한 신호 감쇠가 작아(0.3~0.5dB/km) 증계기 간격을 약 40km까지 늘릴 수 있다. 또, 1.3 $\mu\text{m}$  근방에서는 재료분산이 거의 없어 색분산이 작으므로, 레이저를 사용하면 펄스폭 증가를 작게 할 수 있지만, 다중 모드 광섬유의 모드 분산 문제는 여전히 크게 남는다. Graded-index fiber에 의해서 모드 분산을 크게 줄일 수 있지만, 근본적으로 단일 모드 광섬유를 만들어 하나의 모드만을 전송하면 모드 분산은 없어진다.<sup>[1]</sup> 단일 모드 광섬유는 증계기 없이 약 100km를 전송할 수 있다. 단일 모드만을 전송하기 위해서는 광섬유의 코어(core) 직경이 작아져야 하며(8~10 $\mu\text{m}$ ) LED에 의해서는 이러한 좁은 코어내에 장거리 통신에 충분한 에너지를 집어 넣을 수 없다. 따라서, LED는 단일 모드 광섬유에는 부적합하며 레이저 다이오드가 사용되어야 한다. 단일 모드 광섬유와 1.3 $\mu\text{m}$ 에서 동작하는 GaAsInP 레이저 다이오드를 사용하는 시스템이 최근 실용화되고 있다. 이 시스템은 모드 분산이 없고 색분산도 작으며, 신호감쇠도 대단히 작으므로 매초 2Gbit을 전송할 수 있으며, 증계기 간격은 40~50km이면 된다.

장거리 광섬유 통신을 위해서는 신호감쇠가 가장 작은 파장에서 신호를 전송하는 것이 유리할 것이다. 현재의 광섬유는 1.5~1.65 $\mu\text{m}$ 영역에서 감쇠가 가장 작다. 보통 0.2dB/km이며, 0.16dB/km도 가능하다. 이러한 작은 감쇠율은, 1.3 $\mu\text{m}$ 영역과 비교해서 증계기 간격을 2~3배 증가시킬 수 있게 한다. 그런데, 1.5~1.65 $\mu\text{m}$ 영역에서의 재료 분산이 1.3 $\mu\text{m}$ 에 비해 훨씬 크다. 도파로 분산이 재료분산과 크기는 거의 같고, 부호는 반대가 되도록 하여, 색분산이 거의 零이 되도록 하는 방안이 최근 연구되고 있다. 또한, 최근에 1.5~1.65 $\mu\text{m}$ 에서 동작하는 단일 周波數 레이저<sup>[1]</sup>가 출현하였다. 단일 주파수 레이저는 레이저 광선의 파장폭이 작아 광섬유내에서의 색분산이 거의 문제되지 않는다. 1.5~1.65 $\mu\text{m}$ 의 단일 주파수 레이저에서 나온 빛을 단일 모드 광섬유를 통해 전송하면 損失이 가장 작고 색분산이 거의 없으므로, 매초 2Gbit을 증계기 없이 100km이상 떨어진 곳에 전송할 수 있을 것이다.

### Ⅲ. 光源과 光檢出器

다중 모드 광섬유는 LED가 光源으로 사용될 수 있지만, LED는 方向성이 작고 입력 결합 효율이 낮아서 단일 모드 광섬유의 코어에 충분한 에너지를 결합시킬수 없으므로 단일 모드 광섬유 시스템에는 레이저 다이오드가 사용되어야 한다.

반도체 레이저는 다른 레이저와 마찬가지로 일종의 Fabry-Perot cavity로 되어 있다. 또, 전기적 특성이 다른 여러가지 형의 반도체가 층을 이루고 있다. double heterostructure GaAs-GaAlAs 레이저의 경우 p형 GaAs, p형 GaAlAs, GaAs활성층, n형 GaAlAs, n형 GaAs 등이 위에서 아래로 층을 이루고 있다. 레이저 다이오드에 순방향 전압을 인가하면 전류가 흐르고, 전자와 hole이 활성층에서 결합시 활성층을 이루는 물질의 band gap에 해당하는 파장의 빛이 유도 방출되며, 두 결정 표면 거울에 의한 공진조건을 만족하는 레이저광이 방출된다. GaAlAs 레이저는 0.8~0.9 $\mu\text{m}$ 의 빛을 낸다. InGaAsP 레이저의 경우에는 p형 GaInAsP, p형 InP, GaInAsP활성층, n형 InP, InP 등이 층을 이루고 있으며, InGaAsP의 구성비를 적당히 조절함으로써 1~1.6 $\mu\text{m}$ 영역의 어떤 파장의 빛도 레이저 出力이 될 수 있다. 레이저의 특성 중에 신뢰도, 온도 의존도, 스펙트럼 폭, 주파수 안정도 등이 중요하다. InGaAsP 레이저는 현재 널리 사용되고 있는 AlGaAs 레이저에 비해 성능이 쉽게 저하되지 않는다. 반면, 레이저 동작 임계전류가 온도에 보다 민감하다.

일반적으로 레이저의 스펙트럼 폭은 레이저 파장의 제곱에 비례하여 증가한다. 따라서 0.85 $\mu\text{m}$ 에 비해 1.3 $\mu\text{m}$ 에서 2.5배 정도 레이저 광선의 스펙트럼 폭이 크다(약 4~6nm). 이와같이 레이저에서 나온 빛이 스펙트럼 폭을 가지므로 색분산이 없는 파장으로부터 50nm 떨어진 파장에서의 색분산은 50km거리의 경우 시스템 대역폭을 1GHz 이하로 제한한다. 실제 레이저를 만들 경우 상당한 중심파장의 이동이 있을 수 있어 색분산이 큰 문제가 된다. 다행히 레이저는 이 파장 영역내에서 discrete한 파장의 좁은 파장 packet만을 빛으로 방출한다. 이 현상은 Fabry-Perot cavity의 縱모드 스펙트럼에 의한 것이다. 만약 이러한 packet중에서 하나만을 신뢰도 높게 골라 낼 수 있다면(단일 周波數 레이저), 광섬유에서 분산은 별 문제가 되지 않을 것이다.

레이저 cavity내에서의 distributed feedback, external wavelength selection, injection locking, cleaved-coupled cavity 등이 단일 周波數 레이저를 만드는 데 이용되고 있다. 단일 周波數 레이저는 빛을 내는

스펙트럼을 좁게하여 좁으로써 분산을 없애줄 뿐만 아니라 모드 hopping 문제도 해결해 준다. 레이저 에너지는 한 모드에 계속 머물러 있지 않고 한 모드에서 인접해 있는 다른 모드로 이동하여 레이저 광선의 잡음이 커지게 한다. 위의 단일 縱모드를 얻기 위한 방법에 의해서 모드 hopping이 없어지게 할 수 있다.

단일 모드 광섬유의 출력단에서 신호를 받아 이를 電氣的 信號로 바꾸어 주기 위해서는 集積 PIN field-effect 트랜지스터와 avalanche photodiode (APD) 가 사용될 수 있다. PIN FET 受信器는 이득이 없는 GaInAs photodiode와 高임피던스 front-end 증폭기로 구성되어 있다. 이 集積素子는 낮은 전압에서 동작이 가능하고, 온도에 덜 민감하며, APD에서와 같은 歸還制御를 할 필요가 없다. 또한, 신뢰도가 높고 만들기가 쉬운 편이다. 현재 1.3 $\mu$ m에서 PIN FET의 受信感度は 100Mbit/초에서 -48dBm, 300Mbit/초에서 -40dBm 정도이다. 그리고, Ge APD나 GaInAsP APD도 사용되고 있는데, 1000Mbit/초 이상의 전송속도에는 Ge APD가 성능이 더 우수하다. Ge APD의 受信感度は 100Mbit/초에서 -42dBm, 300Mbit/초에서 -37dBm 정도이다. GaInAsP APD도 활발히 연구되고 있으며 결과도 좋지만, 실제 시스템에는 아직 사용되고 있지 않다.

#### IV. 광섬유통신기술의 이용

광섬유는 종래의 동축 케이블과 비교하여 여러 가지의 큰 장점을 가졌다. 기존의 동축 케이블내의 고주파 신호는 수 100미터를 진행하면서 光信號가 반으로 줄어들지만, 광섬유의 경우 수 10km를 진행해야 광신호의 반을 잃게 된다. 따라서 중계기 간격을 훨씬 크게 할 수 있다. 동축 케이블은 직경이 10mm 정도인데, 광섬유는 플라스틱 코팅을 포함하여 직경이 0.25~0.5mm로 대단히 작다. 따라서 무게가 작아지게 되며 기계적 유연성이 좋아서 운반, 설치에 편리하고 공간도 작게 차지한다. 또, 광섬유는 벼락에 대비하여 接地시킬 필요가 없고, 광섬유내의 광파와 광섬유 바깥의 전자파의 干涉이 없으므로 盜聽이 어렵다. 또, 광섬유의 재료인 矽砂는 구리처럼 비싸지 않다. 이러한 장점들로 인해, 전화통신망에서 기존의 동축 케이블을 대체할 수 있을 것이며, 이외에도 이용분야는 계속 증대될 전망이다. 현재의 구리 케이블 시스템의 경우 중계기 간격이 2~10km인데, 광섬유는 수 10km 이상으로 중계기 간격을 크게 할 수 있다. 특히, 장거리 통신 시스템

에 대해서는 단일 모드 광섬유를 통한 장파장 영역에서의 전송이 신호손실이 작고 정보전송 용량이 크므로 앞으로 유망할 것이다. 해저 케이블에도 광섬유 시스템이 많이 사용될 전망이다. 장거리 통신외에도, 전송한 바와 같이, 새로운 廣帶域 서비스의 이용도 큰 관심을 끌고 있다. 보다 장기적인 안목으로는, 대용량의 광섬유 통신 시스템에의해 각 가정에 갖가지 종류의 서비스가 이루어지는, 소위 「정보사회」의 실현이 가까와졌다 하겠다.

반도체 레이저 다이오드의 직접변조가 8 GHz 이상의 X-band까지 가능해짐에 따라 초고주파 신호를 광섬유를 통해 전송할 수 있게 되었다. 초고주파 신호는 보통 동축케이블, 자유공간, 금속도파로 등을 통해 전송되고 있다. 그런데, 이러한 초고주파 채널들은 대역폭이 비교적 좁고, 다른 전자파와의 간섭현상이 생기기 쉽다. 또, 동축케이블은 GHz영역에서 損失이 몹시 커서, 10GHz에서 전송거리가 10미터 정도로 제한된다. 자유공간을 통한 전송은 보이는 곳에만 전송이 가능하며, 금속도파로는 비교적 크고 무겁다. 단일 모드 광섬유는 이러한 단점이 없으며, 앞에서 설명한 바와 같은 장점들을 가지므로 수 100미터 거리에서의 광대역 초고주파 링크로 사용될 수 있다.

한편, 광섬유 통신이 통신위성의 역할의 일부를 대체할 수도 있을 것이다. 방송을 목적으로 할 경우에는 위성통신이 큰 장점을 가지지만, 점과 점사이의 통신 (point-to-point communications)에는 많은 여러 가지 장점이 광섬유 통신쪽에 있다<sup>2)</sup>

#### V. 未來의 광섬유통신기술

광섬유 통신이 통신위성의 기능을 일부 대신할 수 있으리라는 사실이 광통신기술이 얼마나 발전했는가를 말해준다. 하지만, 아직도 해결되어야 할 기술적 문제가 많이 남아 있다.

장파장 영역에서의 레이저와 光檢出器가 보다 완벽해야 하며, 값싸게 생산되어야 한다. 장파장 레이저 다이오드와 LED가 檢出器보다 기술이 앞서 있기는 하지만, 가격이 너무 비싸고, 1.5 $\mu$ m영역에서는 생산량이 극히 제한되어 있다. 최근에는, 0.8~0.9 $\mu$ m에서 동작하는 레이저 다이오드의 가격이 100달러 이하가 되었으며, 이 또한 다량주문의 경우에 한한다. 양질의 1.3 $\mu$ m레이저는 가격이 1000달러 정도이며, 이는 신뢰도가 높은 레이저를 만들기가 대단히 어렵기 때문인 것 같다. 1.55 $\mu$ m레이저는 보다 값이 비싸며, 몇몇 회사에서만 생산하고 있다. 일단 레이저 다이오드의 가

격이 내려가면, 1.3 $\mu$ m시스템이 지금보다 훨씬 매력 적일 것이다.

Ⅵ. 國內의 現況

장거리 통신을 위한 장파장 영역에서의 單一周波數 레이저에 대한 연구와 함께, 단파장에서 고속변조시에 도 10mW 이상의 出力을 낼 수 있는 高出力 單一周波數 레이저에 대한 연구도 진행되고 있다. 出力의 증가는 신호를 크게 하여, splice와 connector에 의한 손실에 잘 견딜 수 있게 할 것이다. 高出力 단일 주파수 AlGaAs 레이저는 기존의 AlGaAs 레이저와 비교해서 단거리 통신 시스템에서 정보 전송 용량을 증대시킬 것이다. 따라서 이러한 단일 주파수 레이저에서 나온 빛을 단일 모드 광섬유를 통해 전송하면 단거리 통신망의 정보 전송 용량이 현재보다 10~100 배 정도 커질 것이다.

국내에서는 KAIST 응용광학실과 국내 산업체가 중심이 되어 광섬유가 개발되고, KETRI와 국내 산업체의 기술로 구로와 안양간의 광통신 시스템이 가설되었다. 또, 반도체 레이저 제작을 위한 노력을 KAIST 전자공학부, KETRI 등에서 하고 있으며, 최근 KAIST에서 GaAlAs LED와 펄스 레이저 다이오드의 실험실 제작에 성공하였다. 이에 따라, 업계에서도 광섬유 통신분야에 대한 투자가 급증하고 있다.

기술 수준이 높은 선진 각국과의 기술제휴도 주요 고려대상이 되겠으나, 우선 당장은 좋은 결과를 얻지 못하더라도 각종 기술의 국내 개발을 위한 지속적인 투자도 확대되어야 할 것이다.

參 考 文 獻

단일 주파수 레이저의 개발은 다음 세대의 광섬유 통신방식으로 coherent 광통신을 생각하게 하였다. 라디오波에서처럼, 光波를 헤테로다인 방식으로 변조함으로써, 광통신 시스템의 感度を 10배이상 증대시킬 수 있다. 하지만, 미래의 이러한 응용을 위해서는 매우 안정되고, 스펙트럼 폭이 대단히 좁고, 出力이 매우 큰 단일 주파수 레이저가 만들어져야 할 것이다.

장기적인 안목으로는, mid-infrared 광섬유도 새로운 가능성을 가지고 있다. Fluoride 유리나 다른 여러 물질이 현재 사용되고 있는 산화유리 광섬유와 비교해서 손실이 10~100배 정도 작다. 하지만, 이는 수  $\mu$ m 또는 그 이상의 파장에서이다. 아직까지는 결과가 고무적이지만, 해결해야 할 문제들이 너무나 많다. 光源과 檢出器도 개발되어야 할 것이다.

[1] T.E. Bell, "Single-frequency semiconductor lasers," *IEEE Spectrum*, vol. 20, no. 12, pp.38-45, 1983.  
 [2] D.B. Keck, "Single-mode fibers outperform multimode cables," *IEEE Spectrum*, vol. 20, no.3, pp.30-37, 1983.  
 [3] D.A. Duke, "Fiberoptics in 1983: a status report," *Laser Focus*, vol.19, no.9, pp.154-164, 1983.  
 [4] S.E. Miller and A.G. Chynoweth Ed., *Optical Fiber Telecommunications*. Academic Press, 1980.  
 [5] 姜玟鎬, 申相永, 光纖維通信概論, Ohm社, 1981. \*

◆ 用 語 解 說 ◆

데이터베이스 시스템의 설계

논리적 설계	4차단계	사용자의 관점에서 data mapping을 어떤 방식을 취하는가에 따라서 관계(relational)모형, 階層(hierarchical)모형, 網(network)모형으로 나뉜다.	실체적 설계	2차단계	Storage structure의 encoding을 pointer array로 할 것인가 ring의 형태로 할 것인가하는 문제를 결정한다.
	3차단계	보조기억장치에 file 구조를 어떤 형태로 설계할 것인가를 결정한다. 예를 들면 multilist file로 할 것인가, inverted list file로 할 것인가하는 문제를 결정한다.		1차단계	운영체제가 어떤 方法으로 데이터베이스를 access 하는가 하는 문제이다. 例를 들면 ISAM 方式인가, DAM 方式인가하는 문제를 결정한다.