

## 반도체 광소자의 특성 및 응용

洪 彰 禧

韓國海洋大學  
電子通信工學科 教授 (工博)

光電子工學이란 전기공학의 기반위에 진공관과 트랜지스터의 탄생에 힘입어 발전한 전자공학 그리고 이들 기술의 터전위에 레이저의 탄생에 힘입어 발전하고 있는 하나의 새 시대의 학문 또는 산업 분야라고 볼 수 있다. 빛의 單色性을 제어할 수 있는 장치인 레이저를 제작하는 기술이 발달되면서 부터 레이저 빛의 특징인 單色性, 直進·指向性, 그리고 高에너지 밀도의 集束性을 이용하기 위한 여러 연구분야들이 급진적으로 싹트기 시작하였고, 그 결과 非線形光學, 光通信, 光記錄·再生, 光計測, 加工 나아가서는 의료, 화학반응, 핵융합에 이르기까지 방대한 분야에 걸쳐 팔목할만 할 연구성과들이 얻어졌으며, 또 많은 분야들이 실용화 되어 있는 실정에 있다. 특히 光섬유통신이라는 획기적인 通信方法이 실용화 단계에 들어서므로 해서 광전자공학의 터전은 튼튼히 다져지게 되었다.

현재로서는 광섬유통신 기술이 급속하게 보급되어 감에 따라 통신기술의 혁신기를 맞이하고 있으며, 대용량메모리, 비디오텍스, 아날로그디스크, 그리고 PCM 오디오레코오더 등 광디스크 기술이 개발되어 이들 중 어떤 것은 이미 市販되고 있는 것들도 있다. 한편, 레이저에 의한 切斷, 용접등 加工기술의 開發 나아가서는 레이저 照明, 藝術등에 이르기까지 각종 형태로 기술이 개발·보급되므로 해서 1990년대 말이나 2,000년대 초에 들어선다면 지금 반도체를 주축으로 하는 전자공학이 전성기인 것처럼 광전자공학의 전성기를 받게 될 것으로 믿어진다.

1960년대 초 레이저가 발명되면서부터 오늘 날까지 약 20여년간 연구·개발되어 온 분야를 대략 綜合해보면 다음과 같다.

- 1) 정보전송 : 광통신
- 2) 정보기록·재생 : 광디스크, 프린터
- 3) 像情報 : TV, ITV, 表示
- 4) 光情報處理 : 스펙트럼 분석

- 5) 光計測 : 각종 센서, 파이버자이로
- 6) 의료 : 레이저매스, 암치료, 눈치료
- 7) 光電力 : 加工, 核融合
- 8) 화학 : 同位體分離
- 9) 照明 및 藝術

이러한 여러 분야에 걸친 응용들이 이루어지고 있으나 本 主題에서는 이들중 특히 光섬유통신에 관련된 半導體 光素子들에 관해서만 집약하여 그 특성 및 응용분야들에 대해서 소개하고자 한다.

### 1. 光素子

#### 1) 半導體材料와 波長帶域

오늘날 반도체 전자소자에 이용되고 있는 Si는 빛을 잘 발하지 않는 재료로서 빛을 잘 발하는 GaAs와 같은 반도체 재료들은 Si에 비하여 수 천배나 발광 강도가 強하며, 電·光應答 速度가 빠르다. 더구나  $Al_xGa_{1-x}As$ 나  $Ga_xIn_{1-x}PyAs_{1-y}$ 와 같은 화합물 반도체인 경우는 x와 y의 組成比에 따라 임의의 레이저 발진 장을 선택할 수 있는 커다란 장점을 지니고 있다.

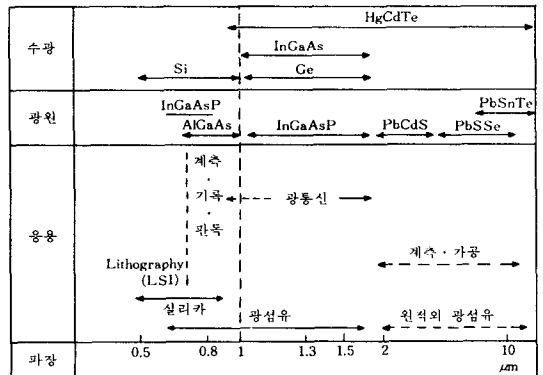


그림 1. 光素子 材料와 그 用途

한편, 光檢出素子用 재료로서는 발광효율이 좋지 못한 Si이나 Ge같은 재료가 오히려 有効하며, 光檢出 효율을 약간 희생할 각오라면 GaAs가 InGaAs등의 발광 효율이 높은 재료도 光檢出재료로 이용될 수가 있다.

이와 같은 理由들때문에 경우에 알맞게 여러 종류의 반도체 재료들이 이용되어 지고 있다. 현재 실용화되어 있는 반도체 레이저의 재료들중 AlGaAs/GaAs는 0.7 $\mu$ m에서 0.9 $\mu$ m사이의 波長에서 발진할 수 있도록 제작할 수 있으며, 1.2 $\mu$ m에서 1.7 $\mu$ m까지는 InGaAsP/InP가 이용되어지고 있다. 그림 1에 있는 사용과장에 관련되어 있는 주요 반도체 재료들과 응용분야들이 그려져 있다.

## 2) 發光 다이오드(LED)

발광 다이오드는 LED(light emitting diode)라고 불리워지고 있으며 通信用 高信賴性 素子들은 推定 素子 壽命이 무려 천만시간 이상을 돌파하고 있다. 한편, 通信用이라면 光電變調 대역폭이 수MHz에서 수백MHz까지 종류가 다양하게 있으며 光섬유와의 결합효율은 약 1~2%정도이고 결합되는 光電力은 數 $\mu$ W에서 數 100 $\mu$ W정도 이다.

## 3) 半導體 레이저(LD)

반도체 레이저는 레이저 자체가 일반 다이오드와 마찬가지로 pn접합에 의한 동작을 하기 때문에 보통 레이저·다이오드(LD:laser diode)라고 불리워지고 있다. 그러나, LED와 다른점은 他種類의 레이저와 마찬가지로 구조상 反射鏡이 있어 光反饋(feed back) 증폭·발진이 가능하다는 것이다. 光素子에 이용되는 반도체 재료의 굴절율은 대략 3~3.6쯤 되므로, 그리고 단결정이므로 쪼개어지면 쪼개어진 바로 그 면이 레이저 공진기 軸方向에 수직으로 놓인 반사경이 된다.

이러한 LD는 光섬유통신용 광원으로서는 뿐만 아니라 高出力, 간섭성을 가지고 있으므로 光디스크의 판독, 프린팅, 계측, 加工에 등 여러가지 용도에 사용될 수 있다.

## 4) LED와 LD의 特性

LED는 간섭성이 없고, 光스펙트럼 폭이 넓기 때문에 (30nm~100nm) 렌즈로 집속시키더라도 발광면적 보다 작은 면적으로 집광시킬 수는 없다. 그러나 출력광은 직선성이 양호하며 온도특성이 좋기 때문에 신뢰성이 좋으며 간편하게 사용할 수 있으며 값도 LD보다 1/10 이하로 싸다.

그러나 LD는 上記한 LED의 特性과는 전혀 상반되는 點들 가지고 있다. 우선 光스펙트럼 폭이 좁기 때문

에 (~0.1nm)적어도 그 光의 波長정도는 집광시킬 수 있다. 通信用 LD는 1~2GHz까지는 안정하게 直接變調가 가능하고, 출력은 보통 수 mW정도이나, 경우에 따라서는 CW 1~2W까지 낼 수 있는 大出力 LD도 만들 수가 있다. 光出力은 發振開始 電流 이상에서 갑작스럽게 增加하며 그 이상에서는 直線性이 대단히 양호하다. LD든 LED든 印加 전압은 약 2~3V 이고, 전류는 10~200mA 정도이다.

LD의 발진과장은 온도가 一定하다면 발진 주파수폭을 數MHz정도까지 줄일 수도 있다(발진 주파수~10<sup>11</sup> Hz). 한 모-드의 波長은 온도의 상승에 따라 약 0.1 nm/°C 率로 변화하지만 2~3°C 온도변화마다 갑작스레 인접 모-드로 뛰어 오르기 때문에 전체적으로 볼 때에는 0.3nm/°C (AlGaAs/GaAs)~0.5nm/°C (GaInAsP/InP) 정도이다. 그런데 GHz정도의 고속 직접변조를 걸어 주면 모-드는 0.2~0.3nm 정도 변동하며, 경우에 따라서는 2~10nm 정도의 폭을 가지는 수도 있다. 그러나, 이런 문제점을 해결한 구조를 가진 動的 單-모-드 LD도 제작이 가능하여졌다.<sup>(1)</sup>

## 5) 表示用 素子

表示裝置의 中心은 아직까지도 브라운관이지만, 장치들이 극소형화 추세에 있는 오늘날에 와서는 LED를 이용하는 사례가 많아져 가고 있다.

## 6) 光檢出素子

光·電變換소자인 광검출 반도체 다이오드는 電·光變換소자인 LD, LED와 더불어 光電子工學에 있어서 핵심소자이다. 이에 대하여서는 발광소자들보다 일찍 개발이 이루어졌으며 종류로서는 광전지, 광다이오드(photo diode: PD), 광트랜지스터 순으로 발달해왔고, 나아가서 光에 대한 波長 특성, 高感度, 高速應答 特性의 要求에 부응하는 재료와 구조 개선에 관한 연구들이 이루어져 왔다. 최근에는 집적화 기술의 발달에 힘입어 單-素子の 형태로부터 自己操作形 어레이 형태등에 관한 연구들도 시작되고 있는 실정이다.

통신에 있어서는 고속, 고감도의 요구가 필연적으로 뒤따르기 때문에 pin 구조의 PD가 일반적으로 사용되며, 그림 1에 보여져 있는 바와 같이 단파장 영역에 있어서는 SiPD가, 그리고 장파장 영역에 있어서는 Ge PD가 주로 이용되어 지고 있다. 이들은 모두 사용 주파수가 수백MHz미만이고 低感度이지만, 역바이어스 전압을 항복전압(-100~-200V) 이하로 걸어 사용하는 APD(avalanche PD)는 사용주파수가 수 GHz 까지 달하며, 自體 增幅도 약 100배까지 가능하다.

2. 光素子の 應用

1) 光섬유통신

發光子 技術이 급진적으로 발전하게 된 동기는 광섬유통신에 있다고 볼 수 있다. 장차 광섬유통신 기술이 발달과 더불어 光素子の 수요는 급격히 늘어날 것으로 예상된다.

2) 情報記録·再生

광디스크의 제작에는 파장이 짧은 Ar 레이저(0.45 $\mu$ m)를 이용하고 있지만 再生에는 He·Ne 레이저나 LD를 이용하고 있고, 점차 LD를 선호하는 추세가 있다.

이 分野야말로 장차 光電子산업의 핵심이 되는 분야가 되리라 생각된다. 아마도 트랜지스터하면 라디오나 텔레비전을 연상하게 되듯 장차 반도체 레이저하면 곧 비디오디스크가 연상이 되는 時代가 到來할 것으로 보인다. 예상되는 용도로서는 영화, 교육등 소프트의 媒體로서 뿐만 아니라, 전자계산기의 대용량 기억장치에도 사용될 전망이 있으며, 100Gbits라는 대용량 디스크도 염가로 선을 보일 것으로 보인다.<sup>(2)(3)</sup>

3) 레이저·프린터

이 역시 光素子が 쓰여질 분야중 대단히 중요한 위치를 차지할 것으로 예상되는 분야이다.

上記 이외에도 건축·토목, 연구개발용 광원, 외과 치료용 등 많은 분야가 생각되어지고 있으며, 장차 LD의 가격하락과 함께 보다 많은 응용분야들이 개척되어

나갈 것으로 기대된다.

표 1은 금년 정월호 laser and application이라는 잡지에서 발췌한 것으로서, 공산권을 제외한 LD의 세계 시장 현황을 나타내고 있다.<sup>(4)</sup> 여기에는 참고로 He·Ne 레이저에 관한 사정도 발췌·기록하였다. 다른 레이저에 비하여 널리 대량으로 이용될 수 있는 특징은 극소형이며 직접변조가 가능하다는 점이라고 생각된다. 즉 대부분의 他레이저는 光을 변조시키기 위하여 外部 변조기가 반드시 필요하지만 LD는 이러한 별도의 변조장치를 필요로 하지도 않으며 또 고속변조까지도 결수 있다는 장점을 가지고 있다.

3. 半導體 레이저(LD)

光素子들中 가장 用途가 多様な 반면 특성도 다양하며 제작이 가장 어려운 素子が LD이므로 이에 대하여 오늘날까지 발전해 온 과정을 밝아가면서 記述하고자 한다

LD연구의 始發點이 되었던 GaAsLD는 1962년에 美國의 GE, IBM, MIT의 세 그룹에 의하여 각각 독립적으로 발표되었다. 當初 이 레이저는 레이저 발전에 요하는 電流密度가 대단히크기 때문에( $\sim 100\text{KA}/\text{cm}^2$ ) 室温에서는 짧은 펄스의 動作만이 가능하였다. 그러나, 레이저의 발전조건, 동작 특성, 스트라이프(stripe)에 의한 橫모-드 제어 理論, 變調特性등 레이저의 重要한 特性들이 1960~1970年 사이에 거의 解明되었다.<sup>(5)-(12)</sup>

1963年 Kroemer는 헤테로·정선(Hetero-Junction) 구조를 이용하면 레이저를 낮은 전류로도 발전시킬 수 있다는 아이디어를 내어 놓으므로 해서 이를 실현하기 위하여 헤테로·정선을 만들기 위한 연구들이 이루어졌다. 1970년에는 美, 소에서 각각 독립적으로 AlGaAs/GaAs로 2중헤테로·정선 구조를 만들어서 室温에서 연속동작을 하는 LD를 탄생시켰다.<sup>(13)</sup> 이 레이저는 波長이 0.7~0.9 $\mu$ m로써 광섬유통신에 있어서는 이 파장대를 短波長이라 한다.

AlGaAs/GaAs DH-LD의 初期에 있어서는 信賴性이 극히 나빠서 수명이 겨우 한 시간 미만의 것들이었다. 그러나, 기계적인 응력의 제거, 결정성장분위기중의 酸化防止에 관한 연구, 스트라이프 제작기술(즉, passivation) 기술의 개발, 오-음接觸技術의 향상, 결정의 劣化機構에 관한 해명 등에 힘입어 레이저의 信賴性은 눈부시게 향상되었고 오늘날 100만 시간을 돌파하고 있다.<sup>(14), (15)</sup>

한편, 스트라이프 構造를 이용하여 橫모-드를 制御시키는 것에 관한 연구들도 진행되어<sup>(16), (17)</sup> SiO<sub>2</sub>, PS

표 1. LD의 세계시장

용도	갯 수(개)				가 격(×\$1,000)			
	1982		1983		1982		1983	
	He-Ne	LD	He-Ne	LD	He-Ne	LD	He-Ne	LD
Agriculture/construction	9000	7200	9000	10000	1200	1430	1200	1980
Metrology	7500	1000	13000	11000	3500	1200	7000	1200
R & D	3200	850	3700	935	1300	1000	1500	1000
Printing	7000	1100	10000	10000	6600	770	5600	950
Typesetting	1000	-	1300	-	130	-	169	-
Video/Aud-Disk	15000	25000	20000	400000	355	250	500	6000
Opt. Comm.	35	12060	60	12000	15	7500	35	14000
Diagnostic Medical	2400	-	2700	-	700	-	931	-
Therapeutic Medical	1530	70	1600	100	490	30	480	32
Entertainment of Display	800	-	800	-	700	-	700	-
Tactical	-	33000	-	35000	-	4000	-	4200
Total	49465	80220	62230	469135	16180	18115	18115	29662

(planar stripe),<sup>[16]</sup> BHs (buried hetero구조),<sup>[19]</sup> TJS (transverse junction stripe)<sup>[20]</sup> 등에 관한 아이디어들의 출현되었으며, 이에 따라 발진모-드특성이 상당히 개선되었다. 이 결과 靜特性상에 있어서는 單-모-드 발진을 하는 LD를 손쉽게 얻을 수 있게 되었다.

LD의 性能向上은, 그 動作理論의 確立에 힘입은 바가 크다. 當初 파라볼릭 밴드구조는 高농도 불순물 도우핑이라는 가정하에 指數函數形의 밴드테일(exponential band tail)모-델을 이용하여 近似的인 理論 전개를 행하였다.<sup>[7]</sup> 따라서 自然光放出과 誘導放出 利得의 전체적인 行動, 특히 發振開始 近傍의 行動만을 記述할 수 있었기 때문에 발진모-드 하나 하나의 온도에 따른 행동 모-드와 모-드사이의 競合현상, 포화과정 등 높은 레벨(high injection pumping level)에서 일어나는 현상들은 이 밴드테일 近似理論으로는 전혀 說明할 수 없었다. 그러나 이런 動作特性들에 관해서는 밴드內的 電子狀態緩和壽命이라는 개념(intraband relaxation lifetime)에 의하여<sup>[21]</sup> 대단히 명쾌하게 說明할 수 있게 되었으며, 지금까지 파라볼릭·밴드구조에 의하여 설명되어온 반도체 이론을 무리없이 확장 적용시킬 수 있는 길이 마련되었다.<sup>[22]</sup>

한편 LD는 반도체 레이저이므로 일반 반도체 소자들의 집적화와 같이 他 레이저와는 달리 하나의 半導體 웨이퍼위에 여러 개의 레이저, 검광기능, 증폭기능, 변조기능 등을 한꺼번에 집적시킬 수 있는 것이다. 이를 위하여 分布形 反射器인 그레이팅(grating)을 가진 레이저들의 개발에 대한 연구가 진행되어 왔고<sup>[23][24]</sup>, 나아가서 誘電體 光導波路를 함께 집적시킨 집적 레이저에 대한 연구도 행하여져 왔다.<sup>[25][26]</sup> 이들 위에 집적화에 관련하여 ETCH 기술로 수직구조를 제작하는 방법이나, 2次元 集積이 가능한 表面 레이저의 開發도 행하여 졌다.<sup>[27]</sup>

반도체 레이저에 걸러 준 전류에 신호를 실어 광출력을 변조시키는 소위 직접 변조 방식은 간단한 방법이지만서도 數GHz라는 초고속의 변조까지 걸 수 있는 커다란 長點을 가지고 있다. 그러나, 이 方法에는 두 가지 난점이 있었다. 즉 高速 펄스동작을 시키면 光出力에 심한 緩和振動<sup>(8)</sup>이 일어나고 또 스펙트럼 폭이 증대하거나 어떤 경우는 多모-드發振이 誘發되어 버린다. 따라서 이 문제는 수백MHz이상의 고속·대용량통신용 소자의 개발에 커다란 장애 요인이 되었었다. 그러나 이 緩和振動的의 發生은 레이저·공진기에 注入된 캐리어의 擴散現狀과 관계를 가지고 있어, 스트라이프 폭을 캐리어의 확산길이( $\sim 1\mu\text{m}$ ) 정도로 좁히면 이

를 억제시킬 수 있음이 밝혀졌으며,<sup>[28]</sup> 결국 이는 스트라이프화에 의한 低電流, 高溫動作, 性能의 개선을 동반하기 때문에, 오늘날의 LD는 공진기의 폭을  $1\sim 5\mu\text{m}$  정도로 제작하는 것이 일반적으로 되었다.<sup>[29]</sup>

반도체 레이저의 잡음은 직접 변조 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다.<sup>[30][31]</sup> 또 이 잡음은 반사파가 공진기에 再注入되는 것에 의해서도 증가될 수도 있다.<sup>[32]</sup> 따라서 고속·장거리통신의 設計에는 이런 문제점들을 감안하여야 한다.

일반 LD는 多모-드 動作을 하는 것이 보통이고, 單-모-드 LD라 하더라도 高速直接變調를 걸면 多모-드化 되어 버린다. 이로 인하여 광섬유 최저 손실 파장대인  $1.5\sim 1.65\mu\text{m}$  光通信에 있어서는 色分散問題가 크게 부각된다. 이 문제를 제거하기 위하여 高速變調時에도 단일 모-드 동작만을 하는 LD에 관한 연구가 행하여 졌다. 그결과 分布形 周期構造 反射鏡을 가진DFB-LD(distribute feedback-LD), DBR-LD(distribute bragg reflector-LD) 등이 탄생되었고, 나아가서는 충분히 寬 모-드를 제어시키므로써 動特性에 있어서도 단일 모-드 동작을 하는 LD가 탄생하게 되었다.<sup>[33,34,35]</sup>

이와같이 하여 반도체 레이저에 있어서의 복잡한 여러 가지 문제들이 1962년서부터 1982년까지 약 20년간 차례 차례 해결되어 나왔고, 그 과정에는 여러번 "이렇게 해 가지고는 LD가 실제로 많은 분야에 쓰여지고 살아 남을 수 있을 만한 물건이 안될 것 같다"라는 회의감도 많았다. 그러나 光섬유통신이라는 확고한 목표가 있었기에 포기하지 않고 연구들을 계속할 수 있었다고 보여진다. 그결과 오늘날에 와서는 불행 알맹이 보다는 작은 LD 一個가 전화 100만 회선 이상의 엄청난 量의 정보를 소화시킬 수 있는 능력을 보유하게 되었다.

한편, 寬 방향 모-드間 結合 特性을 逆이용하는 것으로써 수십개의 LD를 寬방향으로 배열시켜 光出力을 合成시키므로써 수W의 高출력 LD를 얻을 수 있는 기술도 확보하게 되었으며<sup>[36]</sup> 最近들어 개발된 量子우물(quantum-well)구조의 LD는 온도특성이 대단히 양호한 것으로 보아 장차 LD제작기술과 특성개선에 있어서 지대한 역할을 해 줄 것으로 기대되는 바이다.<sup>[37][38]</sup>

#### 4. 光集積回路 및 光素子の 발전 展望

光集積回路는 各種 光素子 및 電子素子를 집적시키는 기술로써,<sup>[39][40]</sup> 多機能화와 光素子の 低價格化를 期持할 수 있기 때문에 이 分野는 光素子에 관한 研究의 미래상이라 볼 수 있다.

현재까지는 半導體形 및 誘電體形의 光集積回路가 별개로 연구되어 왔다. 그런데 半導體形은 두 가지 다른 유형으로 분류해 볼 수 있다. 하나는 集積레이저와 같이 光素子の 性能向上에 직접적으로 응용되는 경우<sup>(40)</sup>이고, 다른 한 쪽은 電子素子和 光素子の 集積으로서 電子回路와의 結合을 좋게 하면서 그 위에 機能도 向上시킬려는 경우이다.<sup>(41)(42)</sup> 基板(substrate)으로 사용되는 GaAs나 InP 단결정은 이동도가 Si나 Ge에 비하여 훨씬 크므로 高速의 電子素子를 同時에 集積시킬 수 있는 뛰어난 특성을 가지고 있는 재료들이다. 따라서 LD와 FET, PD와 FET등을 직접시키는 기술에 관한 연구들이 최근들어 상당히 활발해졌다.<sup>(43)(44)</sup>

이렇게 하면 LD는 전기적으로 低임피던스 素子이기 때문에 高入力 임피던스인 FET에 쉽게 整合시킬 수가 있어서 회로적인 성능을 가일층 향상시킬 수도 있는 것이다.

이상言及한 바와 같이 半導體 光集積回路에 대한 연구는 光電子技術이 進歩에 따라 점차 발전해 나갈 것으로 생각되며, 한편, 光電子技術은 레이저의 특징인 高純度の 單色性, 高密度集光性 등을 充分히 이용할 수 있을 때까지 끊임 없이 발전해 나갈 것으로 期待된다.

#### 參 考 文 獻

- [1] Y. Suematsu, S.Arai and K. Kishino, "Dynamic single-mode semiconductor laser with a distributed reflector," *IEEE J Lightwave Technol.*, vol. LT-1, no. 1, pp. 161-176, 1983.
- [2] K. Compaan, et al, *Philips Tech. Rev.*, no. 33, pp. 178-180, 1973.
- [3] 山本: 텔레비전學會誌, vol. 36, no. 3, pp. 183~187, 1983.
- [4] C. Breck Hitz, *The Laser Marketplace*, 1984, Lasers & Applications, Jan. 1984.
- [5] N. Holonyak, Jr. and S.F. Bevacqua, "Coherent (visible) light emission from Ga (As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 1, no.4, pp. 82, 1962.
- [6] H. Kressel and H. Nelson, *Closed-Confinement Gallium Arsenide PN Junction Lasers with Reduced Optical Loss at Room Temperature*. RCA Rev., 30, pp. 106, 1969.
- [7] G. Lasher and F. Stern, *Spontaneous and Stimulated Recombination Radiation in Semiconductors*. Phys. Rev., 133A, pp. 553, 1964.
- [8] W.W. Anderson, "Mode confinement and gain in junction lasers," *IEEE J. Quantum Electron. QE*.
- [9] T. Ikegami and Y. Suematsu, "Resonance like characteristics of the direct modulation of a junction laser," *Proc. IEEE*, vol. 55, no. 1, pp. 122, 1967.  
T. Ikegami and Y. Suematsu, "Carrier lifetime measurement of a junction laser using direct modulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-4, no. 4, pp. 148, 1968.
- [10] H. Haug, "Quantum-mechanical rate equations for semiconductor lasers," *Phys. Rev.*, vol. 184, no. 2, pp. 338, 1969.
- [11] J. Takamiya, F. Kitasawa and J.I. Nishizawa "Amplitude modulation of diode laser in millimeter wave region," *Proc. IEEE (Lett.)*, vol. 56, pp. 135, 1968.
- [12] C.J. Hwang, "Properties of spontaneous and stimulated emission in GaAs junction lasers. I, II," *Phys. Rev.*, vol. B2, no. 1, pp. 4117, 4126, 1970.
- [13] I. Hayashi, M.B. Panish, P.W. Foy and A. Sumski, "Junction lasers which operate continuously at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 17, no. 3, pp. 109, 1970.
- [14] H. Yonezu, I. Sakuma, T. Kamejima, M. Heno, K. Nishida, Y. Nannichi and I. Hayashi, "Degradation mechanism of (AlGa) As double hetero structure laser diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 24, no.1, pp. 18, 1974.
- [15] W.B. Joyce, R.W. Dixon and R.L. Hartman, "Statistical characterization of the lifetimes of continuously operated (Al, Ga) As double-heterostructure lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 28, no. 11, pp. 684, 1976.
- [16] T. Ikegami "Reflectivity of mode at facet and oscillation mode in double-heterostructure injection lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-8, pp. 470, 1972.
- [17] Y. Suematsu and M. Yamada, "Transverse mode control in semiconductor laser,

- 1972," *IEEE Semiconductor Laser Conf.* 1972.
- [18] J.C. Dymont, Hermite Gaussian mode patterns in GaAs junction lasers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 10, no.3, pp. 84, 1967.
- [19] T. Tsukada "GaAs-Ga<sub>x</sub>Al<sub>1-x</sub>As buried heterostructure injection lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 11, pp. 4899, 1974.
- [20] W. Susaki, H. Namizaki, H. Kan and A. Ito, A new geometry double heterostructure injection laser for room temperature continuous operation junction-stripe-geometry DII lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 6, pp. 2893, 1973.
- [21] Y. Nishimura, K. Kobayashi, I. Ikegami and Y. Suematsu, "Axial-mode interactions in a semiconductor laser," *Monthly Meet, Tech. Group, Quantum Electron.*, vol. QE71-22, IECE Japan, 1971.
- [22] M. Yamada and Y. Suematsu, "A condition of single longitudinal mode operation in injection lasers with index guiding structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-15, no.8, pp. 743-749, 1979.
- [23] H. Kogelnik and C.V. Shank, "Stimulated emission in a periodic structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 18, no.4, pp. 152-154, 1971.
- [24] A. Doi, T. Fukuzawa, M. Nakamura, R. Ito and K. Aiki, "InGaAsP/InP distributed feedback injection lasers fabricated by one-step liquid phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 35, pp. 441-443, 1979.
- [25] Y. Suematsu, M. Yamada and K. Hayashi, "A multihetero-AlGaAs laser with integrated twin guide," *Proc. IEEE*, vol. 63, pp. 208, 1975.
- [26] Y. Abe, K. Kishino, Y. Suematsu and S. Arai, "GaInAsP/InP integrated laser with butt-jointed build-in distributed-Bragg-reflection waveguide," *Electron. Lett.*, vol. 17, no. 25/26, pp. 945-947, 1981.
- [27] K. Iga, B.I. Miller and L.A. Coldren, "GaInAsP/InP stripe laser with etched mirrors fabricated by a wet chemical and reactive ion etching," *Topical Meeting on Integrated and Guided-Wave Optics, Incline Village, Post-Deadline Papers*, PD3, 1980.
- [28] K. Furuya, Y. Suematsu and T. Hong, "Reduction of resonance-like peak in direct-modulation due to carrier diffusion in injection laser," *Appl. Opt.*, vol. 17, no. 12, pp. 1949-1952, 1978.
- [29] N. Chinone, K. Aiki, M. Nakamura and R. Ito, "Effect of lateral mode and carrier density profile on dynamic behaviours of semiconductor lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-14, no. 8, pp. 625-631, 1978.
- [30] T. Ito, S. Machida, K. Nawata and T. Ikegami, "Intensity fluctuation in each longitudinal mode of a multimode AlGaAs laser," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-13, no. 8, pp. 574-579, 1977.
- [31] T. Kobayashi, "Reduction of quantum noise in very narrow planar stripe lasers," *Japan J. Appl. Phys.*, vol. 17, no. 3, pp. 535-540, 1978.
- [32] O. Hirota and Y. Suematsu "Noise properties of injection lasers due to reflected waves," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-15, no.3, pp. 142-144, 1979.
- [33] K. Kishino, S. Aoki and Y. Suematsu, "Wavelength variation of 1.6  $\mu\text{m}$  wavelength buried heterostructure GaInAsP/InP lasers due to direct modulation," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, no.3, pp. 343-351, 1982.
- [34] K. Utaka, K. Kobayashi, F. Koyama, Y. Abe and Y. Suematsu, "Single wavelength operation of 1.53  $\mu\text{m}$  GaInAsP/InP buried heterostructure integrated twin-guide laser with distributed Bragg reflector under direct modulation up to 1 GHz," *Electron. Lett.*, vol. 17, no. 11, pp. 368-369, 1981.
- [35] W.T. Tsang, N.A. Olsson, R.A. Linke and R.A. Logan, "1.5  $\mu\text{m}$  wavelength GaInAsP lasers: single-frequency operation and wideband frequency tuning," *Electron. Lett.*, vol.19, no.11, pp.415-416, 1983.
- [36] C. Lindstroem, R.D. Burnham, D.R. Scifres, T.L. Paoli and W. Streifer, "One watt CW visible, single-quantum-well lasers," *Electron. Lett.*, vol.19, no.3, pp. 80 - 81, 1983.

- [37] J.P. van der Ziel, R. Dingle, R.C. Miller, W. Weigmann and W.A. Nordland, Jr., "Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs-Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As multilayer structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 26, no.8, pp. 463-465, 1975.
- [38] W.T. Tsang, R.A. Logan and J.A. Ditzenberger, "Ultra-low threshold, graded-index waveguide separate confinement, CW buried-heterostructure lasers," *Electron. Lett.*, vol. 18, no. 19, pp. 845-847, 1982.
- [39] S.E. Miller, Integrated optics: An introduction, *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 48, no.7, pp. 2059, 1969.
- [40] Y. Suematsu: *Monolithic Integration of Optical Circuits*, in *Digg. of IOOC'77*, vol. B-1, pp. 185, 1977.
- [41] I. Ury, S. Margalit, M. Yust and A. Yariv, "Monolithic integration of an injection laser and a metal semiconductor field effect transistor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 34, no. 7, pp. 430-431, 1979.
- [42] U. Koren, K.L. Yu, T.R. Chen, N. Bar-Chaim, S. Margalit and A. Yariv, *Monolithic Integration of Very Low Threshold GaInAsP Groove Laser and a Depletion Mode MISFET*. presented at the Topical Meet. on Int. Optics, Pacific Grove, 1982.
- [43] O. Wada, S. Miura, H. Hamaguchi, M. Ito, K. Nakai, M. Makiuchi, and T. Sakurai, "An AlGaAs/GaAs monolithic PiN/FET photoreceiver," *IOOC'83 Tokyo, Technical Digest*, vol. 28B4-2, pp. 184-185, June 1984.
- [44] P.C. Chen, H.D. Law, A. Rezek, and J. Weller, *Monolithic Integration of Laser-FET on Inp*. IOOC'83 Tokyo, Technical Digest, pp. 190-191, June 1983. \*

## 알아봅시다

### 터널 안에서의 누설 케이블

일본의 최고속 탄환열차라 일컬어지는 신간선(新幹線)에는 400MHz의 극초단파 무선전화가 장치되어 있다. 이 전화는 터널안에서도 사용할 수 있다. 전화의 회선수가 적어 금방 '통화중'이 되어 버리는 것이 아쉽지만, 어쨌든 실용화된 터널내 통신으로서는 훌륭한 시스템이다. 이 시스템에 사실은 이제부터 설명한 누설 케이블이 사용되고 있다.

터널안에서 자유로이 전파하는 전파는 속으로 깊숙히 전파함에 따라서 감쇠한다. 전파하는 동안에 터널 주위의 대지로 전파가 흡수되어 버리기 때문이다. 그래서 터널 안 깊숙한 곳과 통신을 하기 위해서는 누설 케이블(leakage cable)이라 불리는 통신 케이블을 부설하여 터널내 통신을 하고 있다.

이 케이블에는 주기적으로 뚫어진 케이블의 작은 구멍으로부터 초단파나 극초단파의 전파를 터널안으로 조금씩 내어 보내어 터널안과 케이블 시발점인 터널 관리실 사이를 연결한다. 이 누설 케이블을 이용하면 케이블에서 새어 나가는 늘 신선한 전파로써 터널안을 채울 수 있다. 그래서 터널안에서의 전파의 교환이 적어지고 위에서 말한 자유전파를 이용하는 방법보

다는 신뢰성과 안전성이라는 점에서 훨씬 뛰어나다. 또 케이블에는 한꺼번에 많은 정보를 전달할 수 있다. 이 케이블 통신방식은 터널안의 통신뿐만 아니고 터널안의 교통관제에도 동시에 이용되고 있다.

그런데 이런 종류의 케이블은 자동차 등의 배기가스로 오염되기 쉽고, 이것의 보수를 위해서도 터널안의 비교적 관리하기 쉬운 위치에 두어지지 않으면 안된다. 그래서 터널안에서 화재 따위가 발생하면 제일 먼저 타 버리게 된다.

1977년 7월에 일본의 도오교와 나고야를 잇는 도오메이(東名)고속도로의 나혼고개(日本坂) 터널에서 자동차 160대가 타버린 큰 화재가 있었다. 이 사고는 터널안의 전자 장치(electronics)를 이용한 터널 관리 방식에 잘못이 있었음을 알려준은 물론 이밖에 사고 때의 터널안의 특수한 환경을 드러내 보인 사건이었다.

누설 케이블의 이용은 굳이 터널에만 국한되지 않는다. 고속도로 전역에 부설해 두면 교통관제나 교통정보의 서어비스에도 이용할 수 있다. 또 대형 빌딩의 복도나 실내에 장치하면, 실내용 사무처리 로봇의 유도 따위도 가능하게 될 것이다.