

技 術 解 說

半 導 體 레이저 製 造 技 術 의 發 達

洪 影 禧
〈韓國海洋大學 助敎授〉

차 례

- 1. 序 言
- 2. 歷史的 背景
- 3. 半導體레이저의 構造
 - 3.1 發光材料
 - 3.2 半導體레이저의 發光構造
 - 3.3 半導體레이저의 製作過程
 - 3.4 半導體레이저의 種類
- 4. 研究動向

1. 序 言

반도체·레이저라함은 반도체·發光·다이오드에 反射鏡을 만들어 줌으로써 光發振作用을 하는 레이저를 말한다. 반도체·레이저가 他레이저에 비하여 특히 다른 點은 크기가 보울펜의 보울 정도로 極 小型이라는 點이라 하겠다. 이렇게 작은 레이저임에도 불구하고 光出力은 數 mW以上 낼 수 있고, 動作電壓·電流는 各各 ~2V, 10~150mA이던 충분하고, 또 電·光變換 效率도 10餘%정도로써 他레이저에 비하여 상당히 높다. 그리고 大量生産이 가능하여 電子産業化 時代에 부응하여 工業的인 측면에서 볼 때 利用될 價値가 높은 레이저라 하겠다.

應用面에 있어서는 비디오·디스크用 光源等과 같이 一般電子裝置의 部品으로서 利用될 展望도 가지고 있으나, 主流를 이루고 있는 것이 光通信用 光源으로서의 利用이라 하겠다. 最近 急進的으로 開發되고 있는 光通信은 유리細線(0.1~0.2mmφ, 一名 光섬유; Optical Fiber)을 光傳送線路로 하는 光섬유 通信이다. 光섬유는 極 低損失 傳送線路라는 利點뿐만 아니라, 大量情報傳送이 가능하며, 특히 誘電體이기 때문에 電·磁氣에 의한 유도장해를 받지 않는다. 따라서 高電壓 傳送케이블과 함께 포설하더라도 지장이 없으므로 電力회사의 電力制御用 通信이나 철도회사의 通信網構成에는 상당히 有利하다. 美·日等先進國의 電力회사에

서는 1976年 頃부터 光섬유 通信의 現地實驗에 着手하였고 좋은 結果들을 얻어 내고 있다. 우리나라에서도 1979年 初 韓國科學技術研究所에서 光섬유 製造에 성공하였고, 1979年末 韓國通信技術研究所에서는 2.4km 거리의 전화국간 중계실험에 들어 갔으며, 1980年 2月에는 韓國電力 부산지점에서는 1.5km거리의 데이터 通信실험에 착수하였다.

이러한 光섬유 通信에 있어서의 光源은 거의 半導體·發光·다이오드(LED: Light Emitting Diode) 또는 반도체·레이저(LD: Laser Diode)를 利用하고 있으며 장차 光섬유통신은 電力制御用 電子計産機·시스템에도 널리 利用될 전망을 가지고 있으므로 本誌를 通하여 半導體레이저의 材料, 發達過程, 構造, 種類, 等에 대하여 簡單히 紹介하고자 한다.

2. 歷史的 背景

역사적으로 본다면 1950年代의 超短波工學에 대한 發達は Maser의 탄생을 가져왔고, 잇따라 1960年代 들어서서는 이 原理를 利用하여 光發振器인 레이저를 發明하였다. 따라서 레이저가 發明되게 된 動機는 極 超短波工學에서의 연구집념이 낳은 하나의 成果라 하겠다¹⁾. 이와같이 레이저는 大量通信의 必要性에 의하여 開發이 추진되었다 하여도 과언이 아니지만 오늘날에 와서는 레이저만이 가지는 性質(高集束性, 高出力性) 때문에 測量, 設計, 裁斷, 醫用, 核融合, 軍事裝備 等 여러 分野에 걸친 응용이 實現되었으니까 드 계속 研究開發中이다. 그러나 레이저를 利用한 光通信은 開發初期에 있어서의 期待와는 달리 아직도 完전한 實用化는 되어 있지도 못하며, 또 레이저應用에 있어서 一 分野에 지나지 않게 되었다.

光通信用 光源으로써 레이저가 利用되기 위하여서는 産業的인 側面에서 보아 우선 當時 通信시스템에 사용되어 지고 있는 素子들 즉, 진공관이나 트랜지스터 等

과 效率, 實用性, 經濟性, 大量生産可能性 等に 있어서 匹敵할 수 있다거나 보다 나아야 된다는 時代的 要求가 뒤따른다. 더구나, 1960年代 當時에는 반도체 공학의 급진적인 발달로 인하여 通信시스템의 各 장치들은 小型化, 高効率化가 시도되고 있었으므로 장치 개발되는 通信용 광원 역시 이러한 추세에 발맞추지 않고서는 産業用으로 크게 발전될 수 없게 마련이었다. 이러한 이유에서 1962年 GaAs (III-V族半導體化合物)을 재료로한 pn접합·다이오드·레이저가 발명되었을 때^{2)~4)} 비상한 관심을 불러 일으켰다.

이 LD의 크기는 0.3mm×0.2mm×0.2mm 정도였으므로 장치의 소형화라는 점에서는 충분히 개발전망이 보였으나, 이렇게 작은 면적을 통하여 수십암페어라는 막대한 전류를 흘려주어야만 레이저 발진을 하였으므로 發熱로 인하여 도저히 室溫動作이 불가능하였다. 따라서 레이저 발명 당시의 기대와는 달리 1960年代末까지는 LD의 光通信用 光源으로서의 전망은 극히 어두운 것이었다.

그러나, 大量通信에 대한 집념과 새로운 技術의 開發에 대한 호기심은 결국 1970년에 들어서면서 GaAs와 AlGaAs의 異種材料를 사용한 異種物質·二重接合·다이오드·레이저(Double-Heterojunction Laser Diode)를 발명시켰다⁵⁾. 이 LD를 發振시키는 데에 필요한 전류는 1A정도였으므로 열발생이 적어 실온 동작이 가능하게 된 것이다. 이에 힘을 얻어 집중적인 연구들이 진행되었고, 10여년이 지난 오늘에 와서는 수십mA의 電流로도 發振되는 LD가 續出되고 있는 실정이다^{6)~7)}. 한편 出力도 數 mW以上, 效率도 십여퍼센트인 素子로 발전되어 工業的으로는 다른 어떤 裝置와도 필적할 만큼 성장되었다. 또 LD의 수명에 있어서도 實驗室資料들에 의하면 10萬時間以上이라는 報告들이 속출되고 있으므로 머지않은 장래에 長壽命

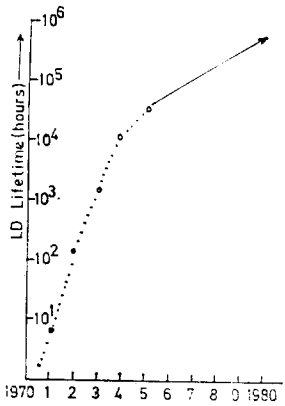


그림 1. 半導體레이저 壽命의 發達

인 LD가 선을 보일 것으로 기대된다. 그림 1에는 LD의 수명이 年度에 따른 變遷과정을 보이고 있다.

3. 半導體레이저의 構造

3.1 發光材料

반도체를 이용하여 전기적인 에너지를 빛에너지로 바꾸는 장치로서는 발광·다이오드(LED)와 반도체·레이저·다이오드(LD)가 있다. LD나 LED의 재료나 발광·머커니즘(mechanism)은 둘다 같지만 구조상에 있어서 LD는 光發振에 필요한 피드·백(feed back)용 반사경을 가지도록 제작되고 LED는 그렇지 못한 것이 차이점이라 하겠다. 따라서 LD와 LED의 제작상 차이는 크게 없으므로 以後부터는 주로 LD에 關하여 紹介해 나가기로 한다.

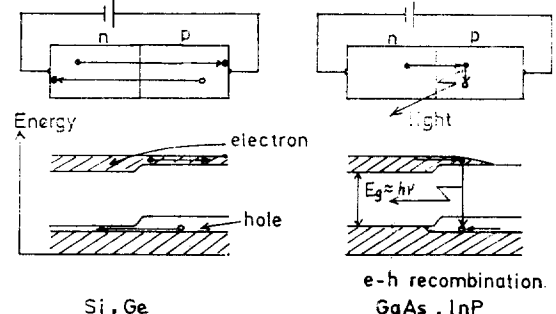


그림 2. 一般다이오드와 半導體레이저用 다이오드의 差異點

그림 2는 一般的인 반도체·접합·다이오드와 發光 다이오드가 가지는 원리적인 차이점을 지적하는 그림이다. 一般다이오드나 발광·다이오드나 하는 차이는 사용된 재료가 전류를 흘려줬을 때 빛을 잘 내는 물질이냐 아니냐 하는데에 있다. GaAs와 같은 화합물은 Si와 같은 재료들 보다는 빛을 발할 수 있는 확율이 수천배나 된다. 따라서 GaAs, InP, GaP와 같이 빛을 잘 내는 물질들이 LD나 LED의 재료가 된다는 것이다.

현재 개발되어 있고 장치 이용도가 높은 LD의 재료들은 下表 1과 같다. 특히 三,四元化合物인 경우에는 Al과 Ga, Ga와 In, As와 P 등의 組成比를 바꾸어 줌으로써 表 1에 기재된 범위內的 임의의 波長을 선택할 수 있다. 이렇게 임의의 波長을 선택할 수 있는 것도 半導體레이저가 가지는 커다란 長點이라 하겠다.

이들 중에서 GaAs나 AlGaAs에 대하여서는 일찍부터 많은 연구가 되어 왔고 현재 거의 실용화 단계에 들어서 있다. 한편 InGaAsP에 대하여서는 현재 光

表 1. LD材料

化合物	物 質	波 長	利用度
四元化合物	InGaAsP	0.9~1.6 μ m	大
Quaternary	InGaAsSb	0.9~1.1 μ m	小
三元化合物	AlGaAs	0.75~0.9 μ m	大
Terntery	InGaAs	0.9~1.2 μ m	小
二元化合物	GaAs	~0.9 μ m	大

섭유의 최저손실을 나타내는 波長인 1.3~1.6 μ m를 내는 LD를 목표로하여 집중적인 연구들이 수행되고 있다. ^{8), 9)10)}

3.2 半導體레이저의 發光構造

LD의 開發初期에 있어서는 수십암페어라는 막대한 전류를 면적이 0.03mm² 정도가 되는 LD에 흘려주어야만 레이저발진을 하였기 때문에 發熱로 因하여 도저히 실온에서 연속적인 동작을 시킬 수가 없었다. 이 난관은 현재 미국의 콜로라도大學 敎授로 있는 H. Kroemer氏의 아이디어에 의하여 1970년 美國의 Bell 電話研究所의 M.B. Panishi, I. Hayashi氏가 이를 實驗的으로 성공시키므로써⁵⁾ 극복되었다. 그 후부터 LD는 급진적인 발전을 보게 되었다. 이 節에서는 이 LD의 原理에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

그림 3에는 LD의 여러가지 接合모양을 나타내고 있다. Homo-Junction (HJ) 구조인 경우에는 順方向인 바이아스를 걸어 주었을 때에 P영역으로 주입된 전자(注入캐리어)는 P영역 깊숙히 확산하여 들어가면서 호홀과 再結合을 하여 發光을 하게 된다. HJ는 同種物質간의 接합이기 때문에 굴절율의 差異는 없으므로 發生된 빛은 다이오드의 넓은 面積에 걸쳐 分布를 하게 된다. 만일 DH구조에서처럼 活性領域(active region)

과 인접영역사이에 굴절율의 差가 생긴다면 이안에 들어 있는 빛은 全反射의 原理에 의하여 活性領域內에 局在化(optical confinement)된다. 이는 마치 가는 유리線을 따라빛이 진행하는 현상과 같은 이치이다.

한편, 레이저가 發振을 하기 위하여서는 光利得이 光損失을 이길 수 있어야 된다. 그런데 HJ구조에 있어서는 光과 注入된 電子가 넓은 영역에 걸쳐 分布되며 더구나 光의 一部는 利得이 없는 부분에도 存在하기 때문에 利得이 損失을 이기기 위하여서는 대단히 큰 전류가 필요하게 된다.

Single-Hetero構造(SH)인 경우에는 P형 GaAs와 P형 AlGaAs가 가지는 에너지·갭(Eg: Energy gap)의 차이 때문에 接合面에는 電位障壁이 생긴다. Al과 Ga의 粗成比에 따라 Eg가 달라지며 Al의 量을 증가시키 가면 Eg는 커져가고 굴절율은 줄어든다. (굴절율: 공기는 약 1, 유리는 1.5. GaAs는 3.6임) GaAs의 Eg는 약 1.4eV이지만 Al_{0.3}Ga_{0.7}As일 것 같으면 Eg는 약 1.8eV가 된다. 이 경우에는 Eg의 차이 0.4eV 정도의 전위장벽이 생긴다. 따라서 P형으로 주입된 전자는 전위장벽에 부딪혀 돌아와 P형 GaAs 즉, 활성영역에 局在(Carrier Confinement)된다. 따라서 활성영역에 존재하는 電子의 수가 HJ인 경우보다는 훨씬 많아지고 보다 작은 전류로도 光發振을 시킬 수 있다.

Double-Hetero構造(DH)에서는 그림에 表示되어 있는 바와 같이 光局在作用과 캐리어 局在作用이 同時에 일어 남으로 光이나 注入電子·호홀이 좁은 活性領域(0.1~0.2 μ m)內에 存在하게 되고 작은 電流로도 레이저 發振에 필요한 光利得을 얻을 수가 있다.

이와 같이 하여 HJ-LD인 경우 發振에 필요한 電流가 약 40A정도였던 것이 DH-LD에서는 1A以下로 줄어 들었으며 室溫連續動作이 가능하게 되었다. DH구조가 개발된지 10여년이 지난 오늘날에는 LD나 LED 모두가 거의 이 구조를 채택하고 있으며 장래에 있어서도 변함이 없을 것으로 예상된다.

3.3 半導體레이저의 製作過程

前節에서 소개한 바와같은 多層膜構造의 結晶을 成長시키는 方法들 중에는 液相成長(LPE: Liquid Phase Epitaxial Growing), 氣相成長(VPE: Vapour Phase Epitaxial Growing), 分子빔입成長(Molecular Beam Epitaxial Growing)方法 등이 있다. 이 중에서 현재 가장 널리 利用되고 있고 그 技術이 확보되어 있는 LPE法에 대하여 簡單히 소개하고자 한다.

그림 4에는 DH구조중 가장 간단한 4層구조의 例를 보이고 있다. 맨 윗층(IV)은 단지 電氣絶緣체로서의 역

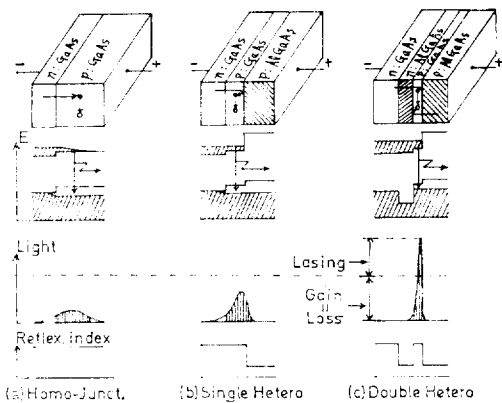


그림 3. 半導體레이저의 여러가지 發光機構

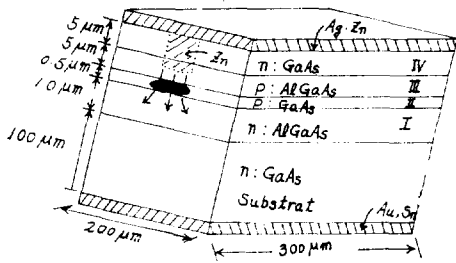
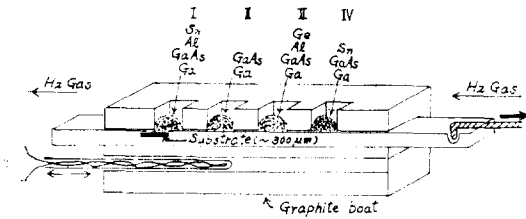


그림 4. 半導體레이저의 完成圖



結晶成長 온도: ~800°C

속도: 0.4°C/min의 경우 0.5~1μm/min

그림 5. 半導體레이저의 結晶成長方法

할만 한다. 그림 5에는 이러한 結晶을 成長시키는 LPE 方法의 一例를 보여주고 있다. 1회 成長에 사용되는 基板의 크기는 研究室마다 조금씩 차이는 있으나 대략 두께 0.3mm, 넓이는 1cm² 정도이다. 이 程度의 크기 라면 50%의 成功率(1cm²의 반이 LD제작에 쓸 수 있음)을 가정하더라도 수백개 以上の LD를 만들어 낼 수 있다.

各 용액의 holder에는 各 層에 해당되는 材料들을 넣는다. Ga은 용매로 들어간다. 전기로속에 넣어 약 850°C 정도로 온도를 가해 주면 各 재료들이 Ga용액 속에 녹아 들어 간다. 완전히 녹힌다음 온도를 강하시켜 주면서 基板을 各 層에 해당되는 용액에 순차적으로 접촉시켜 주면 基板의 위에는 층층이 結晶이 석출된다. 이는 마치 들속에 얼음을 넣고 온도를 낮추어 가면 시간이 경과됨에 따라 얼음이 성장되어 나오는 현상과 같다.

結晶이 成長되는 속도는 온도의 강하율과 성장시간의 함수로 된다. 온도강하율은 연구실마다 다르지만 대략 0.4°C/min 전후이고, Al의 量에 따라 成長속도는 달라지지만 0.4°C/min에서는 대략 0.5~1μm/min 정도가 된다. 결정성장에만 필요한 시간은 약 2시간 정도이며 준비시간까지 합하면 1일 1~2회정도 성장시킬 수가 있다. 成長中에는 結晶表面의 산화방지를 위하여 계속 H₂가스를 흘려준다.

이렇게 하여 成長된 結晶은 發振에 필요한 전류의 量을 줄여주기 위하여 도 發光面積을 좁혀 橫方向의 光

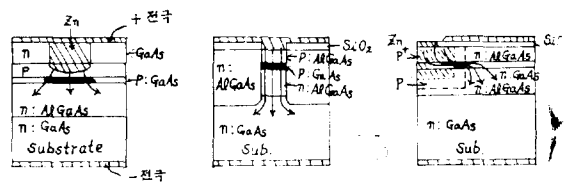
強度分布를 고르게 하여 LD特性을 좋게 하기 위하여 P층위에 그림과 같이 Zn를 선택적으로 확산을 시켜 전류스트라이프(stripe, W≈10~20μm)을 만들어 준다.

그다음 基板의 전기적 저항을 줄이는 한면 깨기(clipping) 쉽게 하기 위하여 基板의 바닥을 약 0.2mm정도 갈아 내버린다. 그러면 웨이퍼(Wafer)의 총 두께는 0.1~0.15mm 정도가 된다. 그 다음 예리한 칼날을 가지고 길이 0.2~0.3mm, 폭 0.2mm 정도로 깨어 내면 한개의 LD가 얻어진다. 單結晶이기 때문에 깨어진 면은 고은 거울면이 되고 이것은 바로 LD用 反射鏡이 된다. 따라서 半導體레이저에 있어서는 따로 反射鏡을 設置할 필요가 없다. 이 정도 크기의 LD는 약 100~200mA의 전류로 發振을 하며 最大 光出力은 發振器의 폭 1μm당 약 1mW가 나온다. 電·光變換率은 LD에 걸리는 전압이 1.4V정도 이므로 10餘%가 된다.

3.4 半導體레이저의 種類

반도체레이저는 一般半導體素子들과 마찬가지로 溫度變化에 민감하다. 주위 온도 변화에는 물론이지만 LD를 통하는 電流에 의하여 内部 온도가 상승되기 때문에 LD動作特性이 영향을 받게 된다. 따라서 如何히 작은 電流로도 어떻게 하면 레이저 動作을 시킬 수 있을 것이냐 하는 쪽에 대한 연구가 進行되어 왔고 구조적인 면에서 수많은 종류의 LD들이 發表되어 왔다. 이들 중에서 거의 實用化단계에 들어 서 있는 代表的인 3가지 形의 LD단을 紹介하고자 한다.

그림 6에는 3種類의 LD스트라이프構造를 보이고 있다. PS-LD에 대하여서는 前節에서 說明하였다. BH-LD인 경우는, 일단 結晶을 최종까지 시키고 난다음 스트라이프(1~10μm) 부분을 제외한 나머지 부분은 化學에칭(etching)方法 등을 써서 基板정도까지 제거시켜버린다. 제거된 자리에는 다시 전기로 속에 넣어서 n형 AlGaAs를 成長시켜 줌으로써 그림과 같이 活性 領域은 完全히 異種物質에 의하여 둘러 싸이게 된다. 이 LD의 動作에 필요한 전류는 5~50mA이다.



Planar Stripe (PS-LD) Hitachi Lab.
Buried Hetero (BH-LD) Hitachi Lab.
Transvers Junction (TJS-LD) Mitsubishi Lab.

그림 6. 半導體레이저의 여러 種類

TJS-LD에 있어서는 결정을 완전히 성장시키고 난 다음 두번에 걸쳐 Zn을 선택적으로 확산시키면 P, P⁺층이 횡방향으로 형성이 되고 接合面이 마치 횡방향으로 되어 있는 것과 같은 효과를 얻어낼 수 있다. 스트라이프의 폭은 1~2 μ m이며 發振에 필요한 電流는 20~50mA이다. BH-LD, TJS-LD 모두다 최대 光出力은 數mW이다.

開發初期에는 發振에 必要한 電류가 수십A였던 것이 오늘날에 와서는 약 1000분의 1인 수십mA로 줄어들었고 이제는 一般半導體素子에 대한 動作條件 수준까지 왔다고 볼 수 있을 정도로 技術開發이 되었다.

LD의 完製品을 만들 경우에는 熱擴散을 좋게 하기 위하여 P형쪽을 金을 증착시킨 다이아몬드나 구리블록(block)에 밀착시키고 n형에는 가는 金線으로 본딩(bonding)하는 것이 通例이다.

4. 研究動向

지금까지는 LD에 關한 研究에 있어서 最大의 關心事는 如何히 發振開始電流를 줄여 주므로써 효율이 좋은 安定動作을 시키느냐 하는 것과 LD의 壽命改善이 없었던 것 같다. 오늘날에 와서는 수십萬 以上の 수명이 확보되었고 發振開始電流도 수십mA로 줄어들었으므로 거의 實用化단계에 들어섰다고 볼 수 있다. 紙面制約 關係로 半導體레이저의 特性에 대하여서는 一切 言及할 수 없었으나, 온도의 變化, 變調에 의한 光出力과 스펙트럼의 不安定性 등은 아직도 큰 문제로 남아 있으며(超高速·長距離通信을 위하여), 高出力을 내는 方法에 대한 研究도 시작되고 있다.

한편 製作方法에 대하여서는 공정인 작게 들고 簡單하며 보다 大量生産이 可能한 方向의 研究가 계속되고 있다. 현재 IC回路에 준하는 光集積회로를 꾸미기가 쉽고 大量生産이 가능한 氣相成長方法에 대한 研究들이 점차로 활발하게 행하여 지고 있다. 그리고 抵損失 光섬유의 光源에 적합한 InGaAsP·InP半導體레이저에 대한 研究도 성숙단계에 접어든 것 같다.

半導體레이저의 開發은 現在까지 光通信用 光源을 目標로 한 것이 主였지만 앞으로 應用分野에 대한 研究가 進行되어 감에 따라 진공관이나 트랜지스터 時代에 상당하는 半導體레이저 時代가 찾아올 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

1. A.L., Schawlow; "Masers and lasers"
2. M.I. Nathan, W.P. Dumke, G.Burns, F.H. Dill, and G.J. Lasher; "Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions", Appl. Phys. Lett., Vol.1, p.62, Nov. 1962.
3. R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, and R.O. Carlson; "Coherent light emission from GaAs junction", Phys. Lett., Vol.9, p.366, Nov. 1962.
4. T.M. Quist, R.H. Rediker, R.J. Keyes, B. Lax, A.L. McWhorter, H.S. Zeiger; "Semiconductor masers of GaAs," Appl. Phys. Lett., Vol.1, p.91, Dec. 1962.
5. I. Hayashi, M.B. Panishi, P.W. Foy, and S. Sumsky; "Junction lasers which operate continuously at room temperature", Appl. Phys. Lett., Vol.17, p.109, Aug. 1970.
6. K. Saito, N. Shige, T. Kajimura, T. Tsukada, M. Maeda, and R. Ito; "Buried-heterostructure lasers as light sources in fiber optic communications", 1977 International Conference on Integrated Optics and Optical Communications, Iooc '77 A5-1, at Tokyo, July 1977.
7. K. Ikeda, H. Kan, E. Oomura, K. Matsui, M. Ishii, N. Susaki; "TJS laser maintaining a single mode even after 12,000 hour cw Aging", Trans. IECE of Japan, Vol. E.61, No.3, Mar. 1978.
8. J.J. Hsich, J.A. Rossi, and J.P. Donnelly; "Room temperature CW operation GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1 μ m", Appl. Phys. Lett., Vol.28, No.12, p.709, 1976.
9. H. Kano, K. Oe, S. Ando, and K. Sugiyama; "Buried stripe GaInAsP/InP DH lasers prepared by using meltback method", J.J. Appl. Phys., Vol.17, No.10, p.1887, 1978.
10. 日本 朝日新聞 1979年 8月 17日 字 記事