

半導체레이저의 研究動向 및 応用

成 萬 永
(檀國大 工大 教授)

■ 目 次 ■

- 1. 序 論
- 2. 半導체레이저의 研究開發動向
 - 2.1 레이저 基礎技術
 - 2.2 半導체 레이저
- 3. 半導체레이저의 應用
 - 3.1 DAD用 光源
 - 3.2 디스크記錄用 光源
 - 3.3 레이저 프린터用 光源
 - 3.4 短·中距離光通信用 光源
- 4. 結 論
- 參考文獻

□ 序 論

레이저란 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation의 약자로 表現되는 電氣 電子裝置로서 1960年에 Hughes 航空社의 Theodore H. Maiman 에 의하여 最初로 루비 레이저가 탄생하였으며 그후 1960年 12月 Bell 研究所의 Javan 등에 의하여 直徑 1.5cm, 길이 1m의 石英管에 1torr의 He과 0.1torr의 Ne를 넣고 양쪽에 反射鏡을 附着하여 高周波放電시킴으로서 1.5 μm 波長의 He-Ne 氣體레이저가 개발되었다. 그렇지만 이것은 루비레이저 처럼 出力이 강하지는 않지만 指向性이 높은 것이 그 特徵을 이루고 있었으며 그후 電話信號로 레이저광을 變調시켜 最初의 레이저通信을 實現할 수 있게 되었다. 그리고 1962年에는 많은 研究開發에 의하여 固體레이저의 종류도 늘어나서 루비 이외의 다른 結晶에서도 連續發振을 實現하였다.

한편 1962年初에 William P. Dumke가 半導體 레이저 材料로서 GaAs의 우수성을 發表하였으며 같은해 10월에 IBM의 Marshall I. Nathan이 半導體레이저의 發振을 報告하였다.

이상과 같이 半導體레이저의 誕生은 루비 및 He-

Ne 레이저에 뒤이어 1962年에 그 기반을 두고 있었으며 低電壓 小電流의 通電에 의하여 쉽게 勵起시킬 수 있고 또 廣範圍한 波長可變이 가능하기 때문에 이 레이저는 當初부터 많은 관심을 불러일으켰다. 그후 實用化를 위한 研究開發過程에서 많은 問題點이 나타나고 있지만 이들 障害要因도 점차 극복되어 最近에는 各種 半導體레이저가 商品化되기에 이르렀다. 특히 GaAs 레이저는 推定壽命이 $10^5 \sim 10^6$ 時間인 長壽命이고 또 레이저特性的 側面에서도 가스, 固體레이저에 비할 만한 品質의 商品이 製作될 수 있는 단계에 와있으며 이미 光通信, 레이저프린터, 비디오디스크 등에 實用化가 시작되었다. 또 $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ 등의 IV-V族 化合物 半導體레이저도 3~30 μm 波長域에서의 重要한 코히런트 波長可變光源으로서 超高分解能 赤外分光, 大氣汚染檢出 등 많은 部分에 活用되고 있다. 아울러 지금도 半導體레이저를 비롯한 가스 및 固體 레이저의 特性向上과 産業에의 活潑한 應用에 대하여 많은 研究開發이 계속 진행되고 있는 실정이다.

따라서 本資料에서는 基礎적인 研究段階로부터 實用디바이스로서의 生産으로 그 重心이 移動되고 있는 동시에 單一波長動作 또는 高出力化 등 새롭고 高性能을 목표로 계속 研究開發되고 있는 半導體 레이저를 중심으로 研究進展과 現狀 및 内外의 動

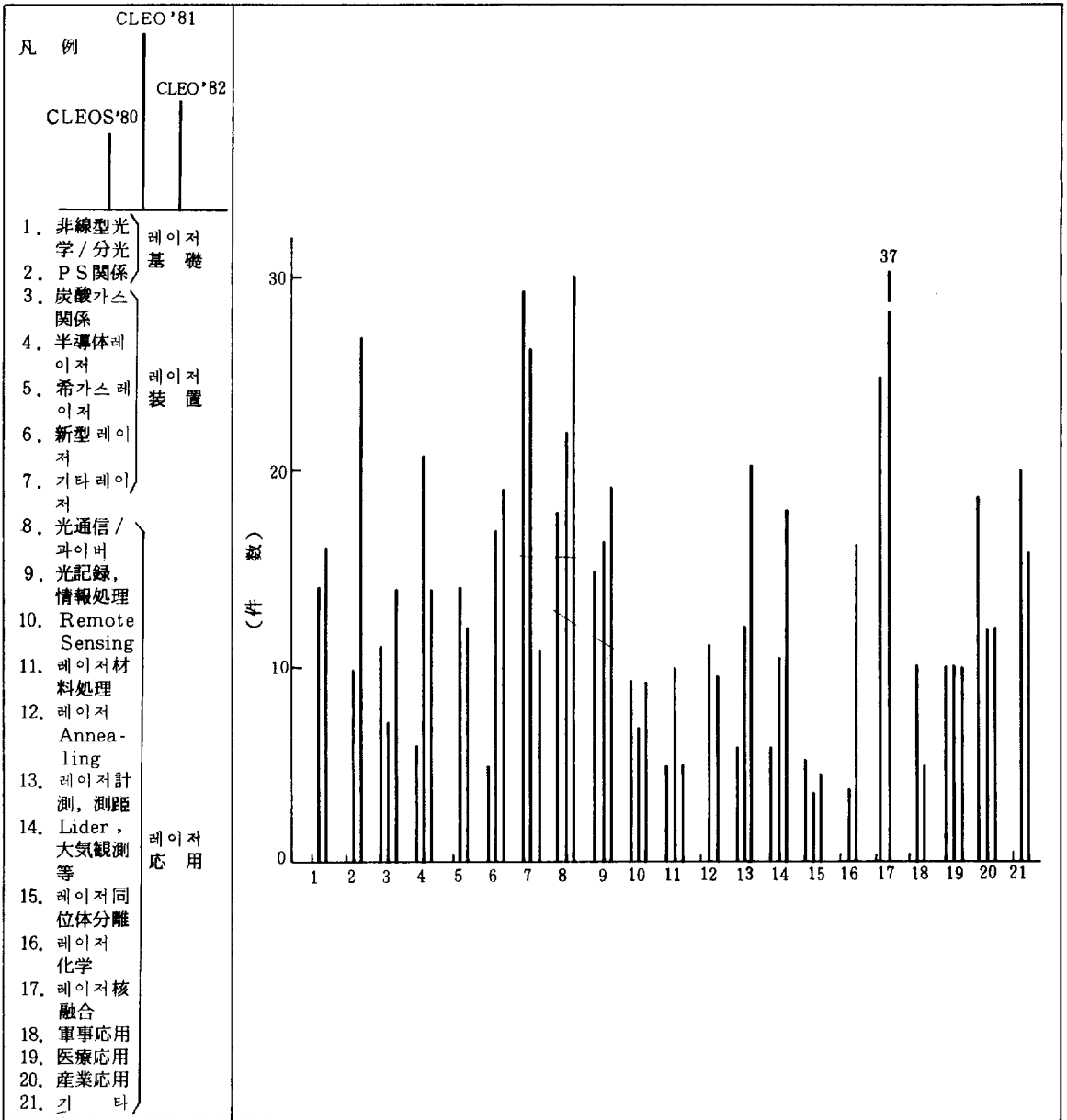
向을 살펴본 후 應用分野와 앞으로의 展望에 대하여 기술하여 보고자 한다.

② 半導체레이저의 研究開發動向

레이저와 레이저의 開發에 活用되는 周邊의 基礎技術은 그 잠재적인 포텐셜과 社會的인 需要에 呼應하여 지금까지 수년간 많은 진전이 이루어졌다.

本項에서는 레이저의 基礎技術 및 科學研究에의 應用, 民生 또는 이와 유사한 레이저의 應用에 관한 最近의 研究成果를 중심으로 레이저의 研究動向에 관하여 기술하고자 한다. 레이저의 基礎로부터 應用까지를 포함하여 권위있는 국제회의로서는 IQEC (International Quantum Electronics Conference), CLEOS(Conference on Laser and Electro Optical Systems), CLEA (Conference on Laser Eng-

표 1. CLEOS, CLEO에 있어서 레이저 關連研究의 發表件數



ineering and Applications), 또는 CLEO (Conference on Laser and Electro Optics : CLEOS 와 CLEA가 매년 서로 교대로 開催하기 위한 것으로서 1981年度에 發足되었다)가 있고 이들에 의하여 各分野에 관한 國際會議, 워크숍(Workshop) 등이 많이 기획되어 실시되고 있다. 이와 같이 레이저의 基礎로부터 應用에 이르기까지의 廣範圍한 研究成果는 여러形態로 公表되거나 또는 檢討되고 있다. 그러므로 이들을 총망라하여 고찰하기에는 본 기술해설의 지면상 적합하지 않은 것으로 생각된다. 따라서 여기에서는 主要國의 레이저에 관한 특허출원 현황과 主要 國際會議의 報告 또는 abstract集을 參考로 하여 레이저의 研究開發動向에 관하여 整理하였다.

表 1에 CLEOS'80, CLEO'81, '82에서 發表된 研究成果의 動向을 나타내었으며 橫軸에 있는 番號는 研究分野를 몇개의 部門別로 나누어 놓은 分類이다. CLEOS의 性格上 CLEO'81, '82에서 볼 수 있는 레이저 基礎의 研究 또는 레이저光學, 레이저의 核融合의 研究發表는 나타나 있지 않지만 이들의 3年間의 會議를 통하여 레이저關連研究의 광목할 만한 進展을 찾아볼 수가 있다. 레이저 基礎에 관해서는 ps (pico-second) 또는 sub-ps發生의 技術이 그 低邊을 자리잡고 있으며 이것을 應用한 分野는 레이저分光學, 生體 光化學反應現象의 研究, 超高速 光電子工學 集積化의 研究등에 미치고 있다. 레이저裝置에 있어서는 CO₂ 가스레이저가 많은 分野에서 利用되고 있으며 이들의 高效率化, 安定化를 위한 技術改良 또는 이에 屬하는 研究成果의 進展이 현저하다. 希가스레이저는 그前途가 기대할만한 한부분으로서, 예를들면 核融合研究에서의 에너지드라이버가 短波長을 指向하고 있는 現在, 이러한 種類의 레이저에 관한 高出力化, 高效率化, 短펄스化는 요망되고 있는 研究指針이다. 그렇지만 MJ 級의 시스템을 만드는데 必要한 經費가 크기때문에 研究의 主流는 比較的 小型레이저에 의한 材料處理 또는 通信에의 應用쪽으로 方向이 進行되고 있다.

새로운 레이저중에서는 自由電子레이저가 그 두각을 들어내고 있으며 自由電子레이저는 그의 波長可變性과 높은 에너지 變換率을 가진 레이저의 研究에 새로운 흐름이 나타나고 있는 실정이며 이러한 레이저의 研究는 미국과 일본등 여러나라에서 理論 및 裝置製作을 통한 實驗研究가 盛況을 이루고 있다. 레이저의 應用에 關해서는 從來의 "電子"에서 "光子"

의 活用으로 바뀌고 있으며 이 光子를 活用하여 光通信, 光파이버와 이것을 利用한 센서, 光記錄, 光情報處理 등의 研究가 매년 증가하는 추세에 있으며 CLEO 등을 細分化한 獨自的인 會議(예를들면 ECIC : European Conference on Integrated Optics, OFC : Optical Fiber Communication, IOOC : Integrated Optics and Optical Fiber Communication) 등이 開催되고 있으며 研究의 進展도 광목할만한 단계에 이르고 있다. 레이저加工에 관한 한가지 有望한 應用例로서 레이저 어닐링(laser annealing)이 있으며 CLEO에서도 독자적인 研究部가 있는 실정이다. 레이저 核融合의 分野에서는 結合係수가 높고 燃料豫備加熱이 比較的 輕減될 수 있는 短波長레이저의 使用에 관한 研究가 많이 이루어지고 레이저의 短波長化와 이에 따르는 周邊技術의 研究가 새로이 가세되고 있으며 10 KJ 大型레이저 시스템의 構成과 計算機에 의한 레이저操作, alignment 등의 制御에 관한 研究가 制度的으로 이루어지고 있다. 表 1에 나타난 統計만을 가지고 레이저 研究의 動向을 評價하는 것은 어려운 일이지만 이것은 앞에서 기술한 바와 같이 레이저 關連研究가 다양하게 이루어지고 있으며 이러한 연구결과가 國際會議場에서 發表되고 있다는 것을 알 수 있다. 또 특히 軍事用 研究 또는 實用化의 最尖端部分에서의 研究에 관해서도 같은 양상으로 고려해 볼 수 있다고 생각하며 以下에서는 半導體레이저와 그 關連技術의 研究動向을 지면관계상 간단하게 기술하여 보고자 한다.

2.1 레이저 基礎技術

레이저의 기초기술로서 ps (pico-second)發生과 그 活用性에 관한 많은 연구가 이루어지고 있으며 ps(pico-second)現象의 研究는 大別하여 1) 10⁻¹⁴秒의 時間領域에 달하는 極短펄스의 發振技術과 計測技術의 研究, 2) 分子의 電子勵起狀態, 振動勵起狀態, 回轉勵起狀態로부터의 緩和過程研究, 3) 光解離, 光異性化, 電荷移動(電子, 프로톤, 이온), 光化學反應過程의 研究, 4) 高密度勵起下的 緩和過程 또는 光照射에 의한 表面溶解過程 등의 半導體物性 및 5) ps 半導體素子(檢出器, 論理回路, 半導體레이저)의 研究 등이 있다. fs(femto-second) 펄스發生은 CLEO'82에서 研究部로 처음 명명된 이래 研究領域은 擴大一路에 있다. CPM法(Colliding Pulse Modelocking)에 의한 90 fs의 펄스로 부터 더욱 이것을 增幅 또는 壓縮한 研究成果가 發表되고 超高速過程의 研究가 進展되므로서 1 ps의 時間近傍

에서 흥미깊은 많은 現象이 일어나고 있다는 것이 명확해지고 있으며 1 ps 또는 sub-ps 펄스가 얻어지고 있는 이온레이저, 勵起모드 同期色素레이저가 중요시 되고 있다. 이 레이저는 1ps 程度의 펄스를 比較的 용이하게 얻는 것이 可能하기 때문에 반복특성도 MHz 程度の 高速이므로 특히 ps 分光의 分野에서 많이 利用되고 있다. 分光分野에서의 光源으로서는 現在 레이저의 使用波長帶가 可視領域에 국한되어 있고 이 領域以外에 있어서 近赤外, 또는 紫外領域에서의 可同調, 高出力, 安定化, sub-ps 펄스의 實現이 요망되고 있다. 半導體레이저는 이러한 의미에서 폭넓은 波長領域에서의 光源으로의 可能性을 가지고 있으며 ps 펄스 發生의 素子도 試作되고 있다.

ps, sub-ps 레이저를 各種材料, 物質中에서의 超音速現象을 能動的으로 解明하는 手法으로 많은 方面에서도 應用되고 있다. ps 分光의 化學에의 應用은 反應의 初期過程, 또는 準安定狀態의 거동을 調整하는 것에 利用되고 있으며 ps 分光의 生體研究에의 應用도 最近 活發하게 研究되고 있고 DNA 또는 헤모글로빈, 크로로필 등의 光化學變化 또는 動的過程으로부터 이들 物質의 構成 또는 新物質에 대한 存在의 確證을 해하는 研究가 試圖되고 있다. 특히 ps 레이저의 安定化, 波長可變化, 高出力化가 進展되어 固體에의 應用도 이루어지고 있는 실정이다. 예를들면 PSTR(Pico-Second Transient Recording) 分光法을 利用하여 勵起狀態의 時間, 空間分解 同時測定이 可能하게 되고 勵起子, 勵起子分子 등 中性粒子에 의한 散亂機構의 解明, 半導體레이저 어닐링(annealing)의 機構解明, 無定形質 실리콘(amorphous silicon) 薄膜에서의 마이크로 스트립 線路에 의한 超高速電子過程의 研究 등이 있다. 그외에 超格子에 의하여 만들어지는 量子狀態間的 勵起, 緩和過程, 半導體中에서의 勵起狀態로부터의 緩和時間 測定등이 있다.

2.2 半導體레이저

半導體레이저의 種類는 여러 가지 있지만 波長, 出力, 材料構造 등에 의하여 製造業體나 使用者에 의하여 共通적으로 쉽게 分類한다.

一般的으로 잘 利用되고 있는 半導體레이저의 種類와 特徵을 表2에 나타내었으며 (단 構造에 따라 分類된 呼稱은 省略하였다.) 이 特性을 中心으로 半導體레이저에 대한 材料 및 素子の 研究開發現況을 기술하여 보면 다음과 같다.

표 2. 半導體레이저의 種類와 特徵

種類	可視光	近赤外光	赤外光	遠赤外光
波長	0.6 ~ 0.8 μm	0.8 ~ 0.9 μm	1 ~ 1.6 μm	> 10 μm
出力	5 ~ 10 mW	普通 5mW 高出力 25mW	~ 5mW	~ 3mW
材料	InGaAsP GaAlAs	GaAlAs	InGaAsP	PbSnTe PbSnSe
応用	OA, 情報處理, 計測器	DAD, 디스크 파일, 光通信	光通信	公害센서, 計測器

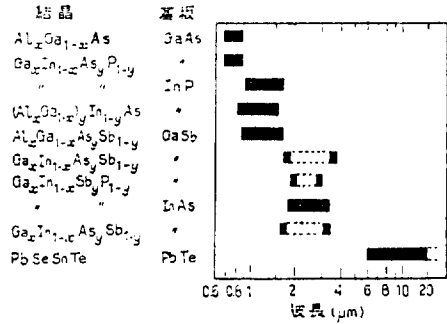


그림 1. 에피택셜 結晶과 레이저의 發振波長

2.2.1 半導體레이저의 材料와 發振波長

半導體레이저用 結晶은 基板結晶上에 單結晶 薄膜層을 成長시켜 만든다. 이 單結晶 薄膜層으로서 GaAs 또는 InP 등의 基板와 格子整合이 잘 이루어지고 또 信賴性이 높은 直接遷移形 半導體材料가 利用되고 있다. 代表的인 基板와 에피택셜 (epitaxial) 成長된 結晶 및 그 發振波長의 範圍는 그림 1에 表示한 바와 같이 波長 0.65 μm ~ 10 μm 以上에 달한다. 現在 利用되고 있는 結晶은 短波長用의 AlGa_{1-x}As/GaAs (波長 0.75 ~ 0.9 μm) 및 長波長用의 Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}/InP (波長 1.2 ~ 1.67 μm)이 있다. 레이저用 結晶의 成長에는 液相成長 (LPE)法이 많이 利用되고 있지만 大面積의 結晶成長 또는 薄膜結晶成長에 있어서 高精度制御가 可能한 氣相成長 (VPE)法이라던가 有機金屬熱分解法 (MOCVD)의 開發이 進전되고 있으며 특히 原子사이즈의 極薄膜結晶의 成長에 우수한 性能을 가진 分子비임 에피택셜成長 (MBE)法도 利用되고 있다. 이들은 最近 超格子構造라던가 QW 構造 등의 量子사이즈效果의 研究에 특히 注目받고 있다. 半導體레이저의 劣化는 (1)活性層 結晶의 劣化, (2)鏡面劣化, (3)분당의 劣化 등에 의한 것으로 생각되고 있다. 약간의 格子不整合 (0.04 ~ 0.1%)이 있는

AlGaAs/GaAs에서도 鏡面을 SiO₂, Al₂O₃, Si₃N₄ 등으로 코팅하면 實用上 數萬時間의 信賴性이 있고 (1)의 條件에 의한 壽命은 100萬時間 以上에 달하고 있는 것이 推定되고 있다. GaInAsP/InP에서는 格子整合性이 좋고 또 結晶이 光強度 및 酸素, 水分 등의 零圍氣에 대하여 강하기 때문에 GaAlAs/GaAs 보다도 長壽命인 것으로 推定되고 있다.

2.2.2 短波長帶 半導体 레이저

1970年 以來의 開發歷史를 가진 GaAlAs/GaAs系 레이저가 0.8 μm帶 光通信의 光源으로서 그의 地位를 유지하고 있으며 1974년경 부터 信賴性을 좀더 높이기 위한 研究가 계속되고 있다. 또한 1980年에 본딩 또는 電極의 問題가 레이저自體의 劣化와 區別하여 解析되므로서 比較的 定量的인 壽命의 推定이 가능하게 되었고 70°C程度의 高溫加速試驗의 結果 室溫換算의 壽命은 10⁶時間 以上인 것으로 발표되고 있다.

그리고 스트라이프 形狀의 開發도 많은 進전을 보

아 臨界值 10~20mA의 레이저도 實用化水準에 달하여 大量生産의 단계에 들어 갔다. GaAlAs系에서는 노출된 端面이 光에 의한 破壞가 있기 때문에 특히 高出力 레이저의 경우에는 端面을 코팅에 의하여 保護하지 않으면 안되며 Si/SiO₂등이 이용되고 있다. GaAlAs系에 관해서는 分子비입 에피택설 (MBE) 또는 有機金屬熱分解法 (MOCVD) 등 氣相成長法이 시도되고 있다. 아울러 이들의 特徵인 極薄膜成長에 의한 레이저 製作의 研究가 병행하여 進行되고 있으며 最近 活性層膜 50~200 Å 정도인 QW (Quantum Well) 構造의 低臨界值 레이저가 만들어 지고 있다. 특히 클러트層의 組成을 GRIN 構造에 의해 150A/cm² 정도인 低臨界 電流密度도 報告되어 있다. 한편 高出力化의 研究도 활발히 進行되고 있어 單體레이저 40mW (實用레벨), 10mW (實用레벨) 등이 얻어지고 있는 것과 더불어 그림 2와 같이 40개 정도의 스트라이프를 조밀하게 配列한 어레이 레이저에서 2.6W의 連續出力이 얻어지고 있는 例도 있다.

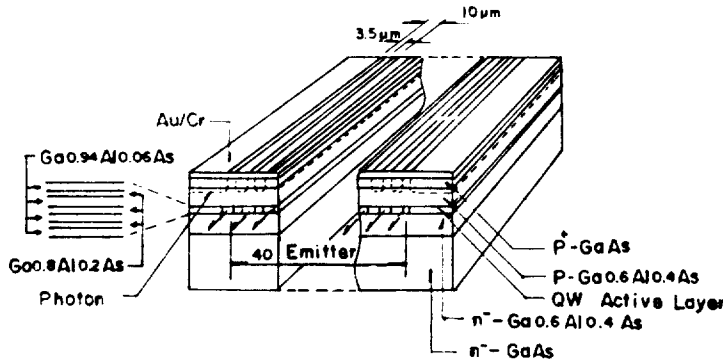


그림 2. 半導體 레이저 어레이

短波長 레이저의 用途는 通信用과 더불어 레이저 디스크에 널리 活用되고 있으며 앞으로 보다 더 큰 시장형성이 예상되고 있다. 이 경우 短波長化 즉 可視화가 기대되는 바이며 GaAlAs系에서는 Al量을 增加시켜 이것을 實現하고 있어 현재 實驗레벨에서는 6820 Å 정도가 얻어진 예도 있지만 實用레벨에서는 7400 Å 정도가 限界로 되어 있다. 可視레이저용의 結晶成長도 여러 측면에서 시도되어 GaAsP 基板위에 GaInAsP, GaInP, AlGaInP, 및 GaInP 등이 試作되고 있다.

2.2.3 長波長帶 半導体 레이저

材料分散이 작게 되는 1.3 μm帶 또는 極低損失로 되는 1.6 μm帶, 이른바 長波長帶 (1.2~1.7 μm)의 光

源으로 使用하기 위하여 1976年 MIT의 SZE에 의한 波長 1.1 μm의 GaInAsP/InP 長波長레이저가 開發되었다. 그후 日本에 있는 몇몇 會社와 大學研究所 (電電公社, 國際電電, 東工大)에 의하여 1977년에 1.3 μm의 長波長레이저와 1979년경에 1.55 μm의 레이저가 試作되어 발표되었으며 1980年 東工大에서 1.5~1.6 μm의 動的 單一모드 레이저에 관한 研究를 기점으로 하여 여러 종류의 動的 單一모드 레이저가 開發되고 있다. 그리고 LED, 光檢出器의 開發도 활발하게 進行되고 있으며 1981~2년에는 이들 半導體 光디바이스도 實用的인 水準에 달하여 實際의 光通信 시스템에 長波長帶가 使用되기 시작하였다. 光과이버通信用 Ga_xIn_{1-x}As, P_{1-x} 레이저에 있어서도 各種의 모드 制御形

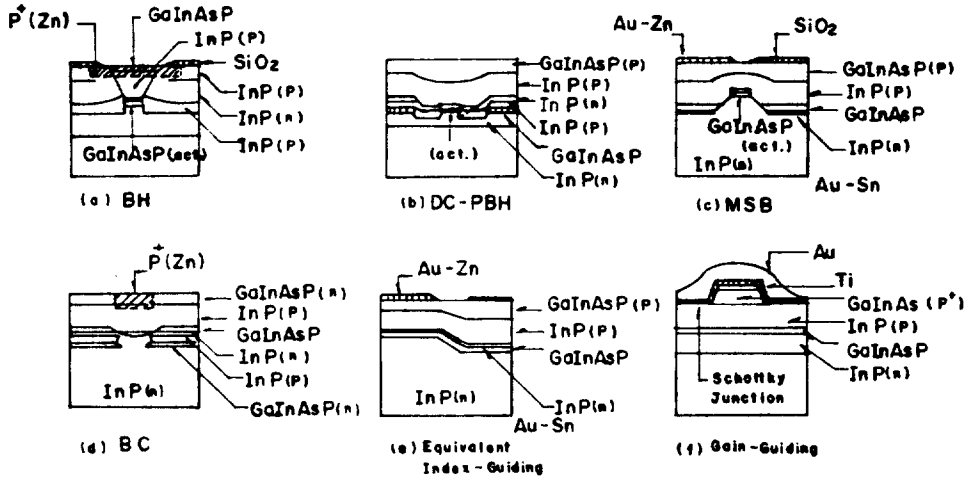


그림 3. 長波長 半導體 레이저의 形式

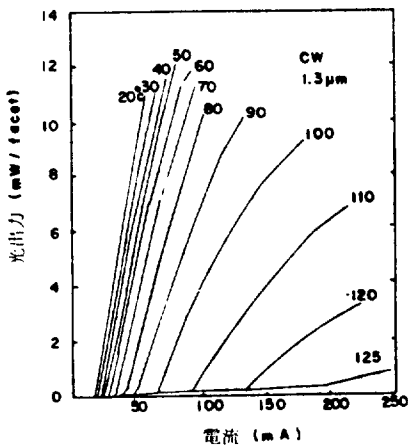


그림 4. 1.3 μm 帶 BH 레이저의 I-L 特性

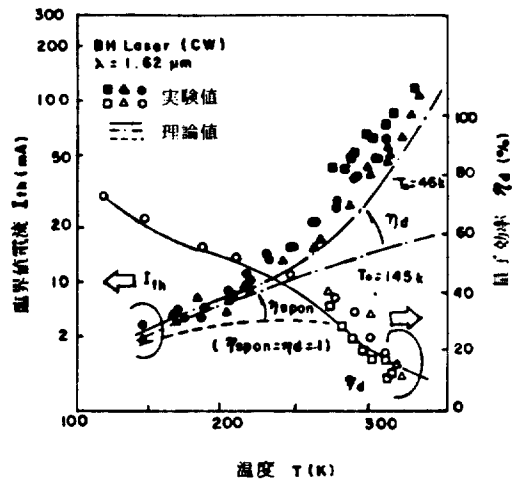


그림 5. 1.6 μm 帶 半導體 레이저의 溫度 特性

(屈折率 導波形) 레이저가 提案되었다. 그림 3에 이러한 屈折率 導波形 GaInAsP/InP 레이저에 대한 예와 그림 4에 埋入形 GaInAsP/InP 레이저의 電流-出力 特性의 例를 나타내었다.

이상과 같이 꾸준한 研究의 結果 1.2~1.6 μm의 범위에서 20~50 mA로 動作하는 레이저의 實用性이 시준되고 있는 실정에 있다.

한편 問題로 되어있는 溫度特性의 原因에 관한 研究도 活潑히 進行되어 대체적으로 그들을 說明할 수 있게 되었다. 즉 레이저의 臨界值 電流의 溫度에 따른 變化를 $I_{th} = I_{th}(T') \exp(T - T'/T_0)$ 로 表示할 수 있고 GaInAsP系 레이저에서는 特性 溫度인 T_0 가

60~70 K이므로 GaAlAs系의 120~150 K에 비하여 대단히 작다는 (溫度特性이 나쁘다) 것이 지적되고 있으며 많은 理論的 및 實驗的 研究의 結果 半導體 레이저의 I_{th} 와 η_d 의 溫度變化를 대략 說明할 수 있는 理論結果가 얻어져서 價電子帶 內의 帶間吸收에 의하여 Auger 效果, 헤테로 障壁으로 부터의 漏洩등을 고려하여 1.6 μm 帶의 BH 레이저에 關한 實驗結果 (그림 5참고)를 說明할 수 있는 단계가 되었다.

또 Nelson 등은 非發光中心, 漏洩등을 否定하고 Auger 效果의 상세한 검토를 시행하였고 헤테로 障壁으로 부터의 漏洩 또는 非發光中心의 存在, Auger 效果 등을 독립적으로 考察하였다. 이러한 研究結果를 참

조하여 볼 때 溫度特性은 GaInAsP 材料 固有의 것으로 생각된다.

그리고 光파이버가 極低損失 (0.2dB/km)로 되는 波長 1.6 μ m帶의 光通信은 매력적이긴 하지만 그곳에 있어서 파이버의 材料分散이 20ps/nm/km이고 큰 펄스 퍼짐이 나타나기 때문에 廣帶域通信이 될 수 없는 것으로 본다. 그러므로 定常狀態에서는 單一波長으로 動作하고 있기 때문에 變調 또는 다스의 溫度變化에 있어서도 單一波長 動作하는 레이저가 바람직한 것이다. 이와 같은 레이저를 動的 單一모드 레이저 (Dynamic Single Mode Laser : DSM 레이저)라 하며 그 必要性을 역설하면서 研究 努力한 결과 최근에 그림 6 과 같이 회절격자를 共振器의 밖에 가지고 있는 分布 불력 反射形 레이저 (DBR 레이저)를 實現하게 되었다.

이 레이저는 그림 6 과 같이 變調하여도 다른 縱모드가 發振하지 않는 경우가 없는 것으로 報告되어 있으며 日本의 電電公社, KDD 研究所 등에서도 1.6 μ m帶의 DFB 레이저를 製作하여 시스템 實驗에 들어가 있다. 한편 벨 研究所에서는 보통의 레이저 속을 분할하여 2개의 共振器를 結合한 Cleaved-Coupled-Cavity (C³)레이저를 試作하여 같은 목적으로 應用하고 있고 또 영국의 BTRL에서는 가스레이저 光을 半導체레이저에 注入하여 同期를 주고 그 波長에서의 動作을 固定하는 實驗을 실시하고 있다.

지금까지 설명한 動的 單一모드 레이저의 構成 例를 그림 7에 表示하였다.

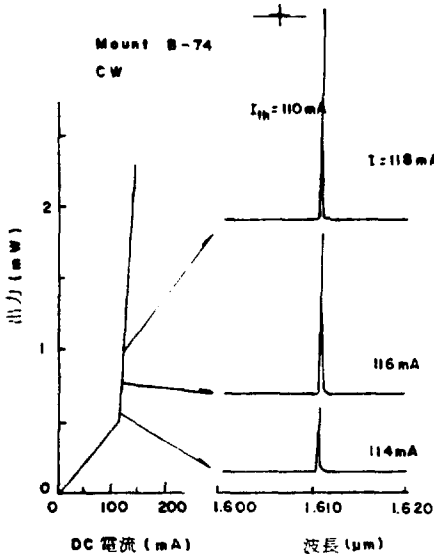


그림 6. 1.6 μ m帶 DBR 레이저의 I-L 특성과 스펙트럼

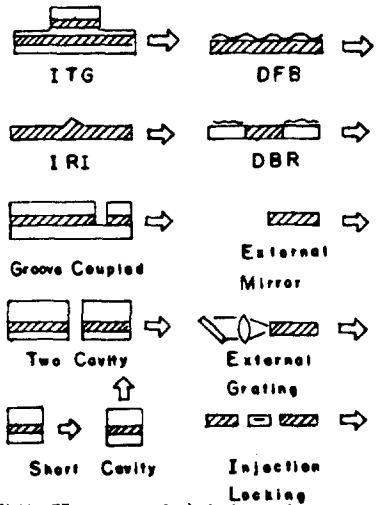


그림 7. 動的 單一모드 레이저의 形式

표 3. 最近 半導체레이저分野의 会社別 日本特許 公告 現況

出 願 会 社 및 出 願 人	年 度				계
	1980	1981	1982	1983	
日 本 電 氣 株	7	24	15	25	71
東 京 芝 浦 電 氣 株	6	22	12	16	56
三 菱 電 氣 株	2	4	23	12	41
工 業 技 術 院 長	2	4	11	19	36
松 下 電 子 工 業 株	1	6	17	11	35
富 士 通 株	—	5	15	11	31
日 本 電 信 電 話 工 社	3	13	9	5	30
株 日 立 製 作 所	—	7	10	7	24
SHARP 株	1	6	10	1	18
防 衛 庁 技 術 研 究 本 部 長	2	1	3	—	6
金 門 電 氣 株	1	2	3	—	6
N.V. PHILIPS CORP.	—	—	4	1	5
WESTERN ELEC. CO. INC.	—	2	3	—	5
I. B. M. CORP.	—	—	1	3	4
OLYMPUS 光 学 工 業 株	—	—	4	—	4
XEROX CORP.	—	1	—	2	3
(財) 半 導 体 研 究 振 興 会	—	2	1	—	3
SONY 株	1	—	1	—	2
航 空 宇 宙 技 術 研 究 所 長	—	—	—	2	2
Siemens AG.	—	1	1	—	2
리 톤 System INC.	—	1	—	1	2
아 브 코 코 포 레 이 션	—	2	—	—	2
持 田 製 藥 株	—	1	—	1	2
I. S. E. CO.	1	—	1	—	2
大 阪 大 学 長	—	—	2	—	2
기 타	19	7	21	17	64
계	46	111	168	133	448

以上에서 記述한 바와 같이 半導體 레이저 分野의 研究開發은 世界各國에서 活潑하게 이루어지고 있으며 이들 研究結果가 特許로 出願公告되는 件數도 매년 增加 추세에 있어 最近 各國에서 출원한 내용도 수만건에 이르고 있는 실정이다. 따라서 本 資料에서는 參考로 日本에 出願公告된 各會社別 特許件數를 表 3에 제시하였고 세계 主要國에서 最近出願한 內容中 半導體 레이저 製造技術에 관한 特許事項은 本 學會誌의 지면 관계상 수록을 생략하고자 하였으며 이에 대한 資料가 필요하신 분은 학회에 연락하시면 복사하여 제공할 수 있음을 부연하고자 합니다.

③ 半導體레이저의 応用

半導體 레이저에서 現在實用化되고 있는 것은 InP-InGaAsP 系의 1.0 ~ 1.5 μm 帶 레이저와 GaAs-GaAlAs 系의 0.78 ~ 0.85 μm 帶의 2 種類이다.

InP-InGaAsP 系의 1 μm 帶 레이저는 光通信用 光源으로서 實用化되고 있고 光通信用에 利用하는 光 파이버의 損失이 1.5 μm 前後의 波長에서 最小로 되고 또 波長의 分散도 작기 때문에 長距離通信用 光源으로서 1 μm 帶 레이저는 最適이다.

한편 GaAs-GaAlAs 를 利用한 可視~近赤外光 레이저는 10年間 많은 研究努力이 이루어져서 아래 기술하는 바와 같은 여러 方面에서 實用化되고 있다.

GaAs-GaAlAs 레이저의 實用化로서는

- 1) 디지털 오디오 디스크 (DAD) 用 光源
- 2) 光學式 디지털記錄用 光源
- 3) 레이저 프린터用 光源
- 4) 短, 中距離 光通信用 光源

등이 있으며 이들에 관하여 상세히 說明하면 다음과 같다.

3.1 DAD用 光源

1982年 10月로서 DAD 裝置가 商品化되어 半導體 레이저의 民生的인 應用에 막이 열렸다고 볼 수 있다. 그러므로 1982年은 半導體 레이저의 實用化 元年으로 말해도 과언이 아닐 것 같다.

DAD는 다이내믹 레인지가 90dB 以上이고 周波數特性이 0 ~ 20 KHz 에서 均一하고 또 非接觸이기 때문에 레코드板을 상하지 않게 하는등 많은 特徵을 가지고 있어 오디오 産業에 획기적인 전기를 마련하였다고 볼 수 있다. 이 DAD 裝置의 픽업 光源으로서 半導體 레이저에 要求되는 特性으로서는

- ① 低電流로 動作할 것

- ② 타원율이 될 수 있는 한 작을 것
 - ③ 單一橫모드 發振일 것
 - ④ 非點収差가 없을 것
 - ⑤ 發振波長은 0.8 μm 前後일 것
- 등이 있다.

以上の 要求中 ①~③은 DAD 用 光源으로서 아주 重要한 事項이다. ①은 裝置를 콤팩트하게 하기 위하여 必要한 것이고 (DAD 裝置를 Compact Disk 裝置라고도 부르고 있다) ②는 레이저와 集光 렌즈와의 結合效率을 크게 하기 위하여 必要한 條件이며 더우기 타원율이 3을 넘으면 結合效率이 極端의으로 작아져 레이저에 있어서 더 높은 出力이 要求되게 된다. ③은 디스크 위에 단일 스폿트 狀으로 조리개를 조절하는데 있어서 必要하고 ④는 光學系를 간단하게 하기 위하여 要求되는 것이며, ⑤는 렌즈系와 조리개로 조절된 스폿트 사이즈의 크기 決定에서 要求되는 것이다. 즉 最小 스폿트徑은 λ/NA 에 比例한다. 여기서 λ 는 레이저의 發振波長, NA는 렌즈의 開口數이다. 지금 NA가 一定한 렌즈를 利用하면 스폿트徑은 λ 에 比例한다. 따라서 스폿트徑은 λ 가 짧은 쪽이 작게 된다. 그러나 여기서 주의해야 할 것은 一般的으로 半導體 레이저는 短波長으로 됨에 따라 動作電流는 增加하고 壽命등의 信賴性이 악화될 수 있는 가능성이 있다. 이에 대하여 波長이 0.78 μm 와 0.8 μm의 레이저에서는 그의 最小 스폿트 徑이 겨우 2.5% 정도 變化하기 때문에 이 정도 波長의 差가 실용상 큰 의미가 있는 것은 아니다. 그리고 CD 用 으로서는 0.8 μm 前後의 레이저가 使用되고 있으며 松下電子工業의 MEL4745 등의 CD 用 레이저가 있다.

3.2 디스크記錄用 光源

光 디스크로서는 TV 静止畫, 文書情報를 파일하는 디스크 파일이라던가 大容量 컴퓨터 메모리가 있다. 光 디스크의 記錄密度는 10^{10} bit/disk로서 磁氣디스크등에 比하여 두자리 정도 높은 記錄密度가 있다. 예를 들면 TV 静止畫을 보면 1枚의 디스크에 15,000 ~ 20,000 코어도 기록할 수 있고 또 數 100 ms의 速度로 랜덤 액세스 될 수 있는 것도 特徵의 1가지이다.

이 記錄法 으로서는 디스크상에 塗布된 記錄媒에 레이저光을 照射하여 熱的으로 蒸發또는 變質시켜 피트를 形成하는 것에 의하여 實現되기 때문에 高出力 半導體 레이저가 要求된다. 具體的으로는 單一橫모드로서 20mW 以上の 光出力으로 發振하는 레이저가 必要로 된다. 디스크에 記錄또는 情報를 解讀

하는데는 같은 半導體 레이저를 利用하여 光出力 數 mW에서 連續使用하는 것이 좋고 1개의 레이저 素子로서 記錄과 解讀이 可能한 것도 큰 特徵의 하나이다.

3.3 레이저 프린터用 光源

레이저 비임 프린터는 nonimpact 式이고 소음이 없으며 高速印字 (10,000 行 / 分), 高品質印字인 것이 特徵으로 되어 있으며 앞으로도 小形化, 低價格化가 實現可能性이 있기 때문에 O A 機器로서 普及

이 크게 기대될 수 있는 商品이다.

프린터用 레이저에 要求되는 特徵으로서는 感光드럼의 感度에 맞는 波長과 高出力이어야 하며 一般的으로 感光體의 感度는 短波長쪽이 높다. 따라서 레이저 光도 780 nm 程度의 波長에서 15 mW 程度의 出力의 것이 요망된다. 그 要求를 만족하는 레이저는 現在 商品化되어 있는 것은 없지만 開發中인 會社數가 많이 늘어나고 있는 실정이다. 參考로 레이저 프린터에 活用되고 있는 各種 레이저와 그 特徵은 表 4, 5에 표시하였다.

표 4. 레이저 비임 프린터에 使用된 레이저의 概略特性和 光導電體

레이저	波長 (nm)	出力 (mW)	寿命 (時間)	光 導 電 體
He - Cd	443	5 - 40	5,000	Se, Se Te, As ₂ Se ₃
Ar	488	5 - 15	3,000	Se, Se Te, As ₂ Se ₃
He - Ne	633	5 - 35	>10,000	Se Te, CdS, As ₂ Se ₃ , PVK-TNF, a-Si
GaAlAs 半導體 레이저	780 ~ 820	3 - 15	>3,000 (20 °C)	Se Te, CdS (長波長 增感) 有機光導電體

표 5. 레이저 비임 프린터 製品機例

区分	會社	型各	印字樣式			光學系			感光體	
			印字樣式(行/分, 8 lpi) 또는, A 4 枚/分	印字幅 (inch)	dot 密度 (/mm)	레이저	變調器	偏向器		
超高速機	I B M	3800	13,360	13.6	5.67 × 7.09	He-Ne	A O	回轉鏡	PVK-TNF	
	Siemens	ND-2	14,000	13.6	5.67 × 7.09	He-Ne	A O	回轉鏡	Se	
	日 立	H-8196(7)-30	15,200	15.0	9.45 × 9.45	He-Cd	A O	回轉鏡	Se	
	日 電	N-7388	14,000	13.6	5.67 × 7.09	He-Ne	A O	回轉鏡	Se	
	富 士 通	FACOM6700D	14,100	13.6	9.45 × 9.45	Ar	A O	回轉鏡	Se	
高速機	Xerox	9700	60枚/分	11.0	11.8 × 11.8	He-Cd	A O	回轉鏡	Se	
	Siemens	ND-3	7,000	13.6	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	Se	
	日 電	N-7858-12	7,000	13.6	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	Se	
	日 立	H-8196(7)-20	7,000	15.0	9.45 × 9.45	He-Cd	A O	回轉鏡	Se	
	Cannon	LBP8021 S	8,029	13.6	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	CdS	
中	Cannon	LBP 2000 S	32枚/分	11.0	11 × 11	He-Ne	A O	回轉鏡	CdS	
	沖	OKILBP	3,600	11.3	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	CdS	
	I B M	6670	36枚/分	11.0	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	OPC	
	Cannon	LBP-10	9.4枚/分	8.3	9.45 × 9.45	L. D	不要	回轉鏡	CdS	
	富 士 通	6715-D	2,670	13.6	9.45 × 9.45	Ar	A O	回轉鏡	Se	
	Ri COH	LP-312	30枚/分	11.0	11.8 × 11.8	He-Ne	A O	回轉鏡	Se	
	Ri COH	LP-212	12枚/分	11.0	11.8 × 11.8	He-Ne	A O	回轉鏡	OPC	
	日 立	H-8172	2,730	15.0	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	Se	
	低	日 電	N-7384-31	3,330	13.6 (17)	9.45 × 9.45	He-Ne	A O	回轉鏡	Se

速 機	東 芝	TOSFILE-2000	17枚/分	8.0	8.5 × 8.5	Ar	AO	Galvano mirro	Se
	Xerox	5700	43枚/分	11.0	11.8 × 11.8	He-Ne	AO	回 轉 鏡	Se
	富 士 通	6716-D	1,330	13.6	9.45 × 9.45	He-Ne	AO	回 轉 鏡	Se
	H P	2680A	45枚/分	11.0	7.09 × 7.09	He-Ne	AO	回 轉 鏡	CdS
	三 田	LP-X	23枚/分		11.8 × 11.8	He-Ne	AO	回 轉 鏡	Se
	Sharp	OA-1000	15枚/分	11.3	9.45 × 9.45	L. D	不要	回 轉 鏡	Se
	富 士 通	M3071A	20枚/分	11.0	9.45 × 9.45	L. D	不要	回 轉 鏡	Se
	富士 Xerox	LXP	40枚/分	11.0	9.45 × 9.45	He-Ne	AO	回 轉 鏡	Se
	Minolta	SP-50	22枚/分	11.0	9.45 × 9.45	He-Ne	AO	回 轉 鏡	Se
	日 立	SL-1000	12枚/分	11.0	16 × 16	L. D	不要	回 轉 鏡	Se
Toray	TORAY 8400	2,000	16.0	11 × 11		AO	回 轉 鏡		

3.4 短·中距離 光通信用 光源

前述한 바와 같이 光通信用 光源으로서는 傳送損失이 적은 1 μm 帶의 레이저가 利用되는 것이 普通이다. 그러나 短, 中距離用 光源으로서 GaAs-GaAlAs의 0.8 ~ 0.9 μm의 레이저가 利用되는 경우도 많이 있고 또 1 μm 帶의 레이저와 함께 利用하여 波長多重通信을 실시하는 것도 試圖되고 있다. 이들에 利用되는 레이저로서는 光파이버와의 結合이 쉬운 構造이고 또 一般의인 民生應用 레이저 보다는 信賴性이 높은 것이 要求되며 光通信用 光源으로서는 많은 연구가 계속 이루어지고 있다. 이상과 같이 半導體 레이저를 光源으로서 파이버를 그 傳送路로 하는 分野의 研究는 實用化에의 過程이 착실히 실행되어 오고 있으며 用途에 따라 技術改良이 이루어지고 있다. 半導體 레이저에서는 發振波長의 制御와 安定化가 이것을 利用한 計測, 情報處理의 分野에 擴大하는 면에 있어서도 實用上의 重要한 課題로 되어있다. 또 從來의 1.3 μm 帶에 덧붙여 0.85 μm 短波長 레이저의 橫모드 制御, 生産性的의 向上技術, 高出力 등이 研究의 中心으로 되어 있으며 ps 發生의 分野에 있어서도 관심이 높아져 현재 ps 半導體 레이저에 대하여서도 새로운 成果가 얻어지고 있으며 30 ps의 펄스幅에서 2.5 GHz 程度의 레이저가 實現되고 있어 250 Mb/s의 PCM變調도 報告되고 있다.

受光素子로서는 1.3 ~ 1.5 μm 帶의 InGaAsP/InP, AlGaAsSb/GaSb材料中の 漏洩電流를 減少시키기 위하여 光吸收領域과 發光領域을 分離하는 構造의 紹介라던가 기타 새로운 構造의 素子が 發表되고 있다. 한편 파이버에 關하여서는 日本과 美國 등에서 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이며 코닝

社, Bell 研究所 등에서 파이버製造와 그에 대한 改善點에 關한 報告가 많이 나오고 있다. 여하튼 實用段階에 들어간 光通信用의 高品質, 量産化, 高信賴化의 研究成果가 中心을 이루고 있으며 光파이버 通信시스템에서는 GTE Communication Products社로부터 45 ~ 100 Mbit/s인 42km 無中繼 傳送시스템이, 영국 BTRL로부터는 같은 양상을 가진 30 km의 單一모드 파이버傳送시스템에 關한 報告도 나오고 있으며, 세계각국에서 大規模 光通信시스템의 建設이 計劃되고 있어 總延長 千km 程度의 光케이블 網 시스템이 實現될 수 있다고 본다.

最近 話題의 초점이 되고 있는 파이버센서에 대하여서는 從來 各種센서(溫度, 壓力, 位置 등)에 추가하여 高精度 파이버자이로, 高感度 磁氣센서 등의 進展이 현저하게 이루어지고 있으며, 후자의 경우 單一모드 파이버에 磁氣歪金屬을 포함한 玻璃 파이버를 接續한 것으로서 5 × 10⁻⁹ G의 微小磁界의 檢出이 可能하다고 報告되고 있다.

한편, 앞에서 기술한 半導體 레이저의 應用分野以外에도 現在 레이저에 의한 材料의 處理, 어닐링(annealing), 레이저計測, 레이저化學, 同位體分離 및 레이저 核融合을 비롯하여 醫療分野에 이르기까지 넓은 分野에서 活用되면서 그 特性의 우수성을 과시하고 있다. 그러므로 半導體 레이저도 研究開發의 시기는 늦게 이루어지고 있지만 앞으로 다른 레이저裝置와 相互補完的인 關係를 유지하면서 産業分野에서 폭넓게 應用될 수 있다고 본다.

4 結 論

本 資料에 있어서는 上述한 바와 같이 半導體 레

이저 基礎로부터 應用에까지 最近 2~3年間の 世界の 動向에 關하여 기술하였다. 레이저의 基礎分野는 ps 펄스 發生技術이 各重 科學研究用의 光源으로서 폭넓은 응용과 實用化를 위한 研究의 進展이 期待될 수 있고, 各重 레이저裝置도 使用目的指向의 改善과 自由電子 레이저의 開發研究가 더욱 깊게 研究 檢討되고 있는 동시에 半導體 레이저에 있어서는 高出力化, 高信賴性化가 요망되며 短波長化(0.6 μ m 程度) 또는 公害檢出器用 등의 遠赤外레이저의 進展이 이루어져야 할 것으로 본다.

그리고 레이저와 다른 機能素子와의 組合에 의한 光集積回路, 光-電子 集積回路와 컴퓨터 構成을 위한 光論理回路 시스템의 研究開發에 대한 努力이 가 증되고 있는 단계에 있다.

上述한 바와 같이 半導體 레이저는 量子電子工學에 있어서도 特異한 位置를 차지하고 있는 것으로서 光電子工學의 主要光源으로서 開發 및 實用化가 進行되고 있다. 그것은 이 레이저가 小形, 高効率, 高速의 直接變調가 용이한 것 등 다른 레이저에서 볼 수 없는 많은 特徵을 가지고 있는 것과 더불어 高信賴性이 實證되고 있기 때문이다. 實用성이 점점 높아짐에 따라 레이저 特性에 關하여 다방면으로 再檢討가 이루어지고 레이저作用의 原理面에 대하여서도 많은 研究檢討가 이루어지고 있다. 共振모드와 그安定化 등의 靜特性, 出力光의 強度 및 스펙트럼에 關한 動特性에 이르기까지 상세한 검토가 이루어지고 있는 동시에 레이저 共振器 自體에 關한 檢討도 이루어져 從來의 構造를 根本적으로 變化시켜 性能을 비약적으로 向上시키는 方向으로의 검토도 진행되고 있다.

그러므로 半導體 레이저는 이제 基礎的인 研究段階로부터 實用디바이스로서의 生産으로 그重心이 移動되고 있는 동시에 單一波長動作 또는 高出力化 등 새롭고 高性能을 목표로하여 계속 研究開發되고 있는 실정이다. 또 MBE 나 MOCVD 法이 利用되어 極薄膜의 活性層을 가진 Quantum-Well 레이저에서는 극히 낮은 임계전류밀도를 가진 레이저등에 研究가 추진되고 있다.

따라서 우리나라에서도 現在 半導體産業의 흐름에 맞추어 半導體 레이저에 대한 研究開發 및 應用分野의 活性化를 이룩해야 할 것으로 생각된다.

本 解説의 지면 관계상 세계 主要國의 半導體레이저 分野에 대한 特許出願公告 內容을 수록하지 못하였읍니다.

따라서 이에 대한 資料가 필요하신 분은 學會에 연락하시면 복사하여 제공하여 드릴 수 있습니다.

參 考 文 獻

- 1) I. Hayashi, M.B. P. Anish, P.W. Foy & A. Sumski: Junction lasers which operate continuously at room temperature. Phys. Lett. 17. No. 3, p. 109 (Aug. 1970)
- 2) S.E. Miller, E.A.J. Marcatili & T. Li: Research toward optical fiber transmission systems. Proc. IEEE. 61. p. 1703 (Dec. 1973)
- 3) H. Imai, K. Hori, M. Takusagawa & K. Wakita: Activation energy of degradation in GaAlAs double-heterostructure laser diodes. J. Appl. Phys. 52, 5, p. 3167 (May, 1981)
- 4) A.Y. Cho, R.W. Dixon, H.C. Casey, Jr & R.L. Hartman: Continuous room temperature operation of GaAs-Al_xGa_{1-x}As double heterostructure lasers prepared by molecular-beam epitaxy, Appl. Phys. Lett. 28. p. 501 (May, 1976)
- 5) R.D. Dupuis & P.D. Dapkus: Ga_{1-x}Al_xAs/Ga_{1-x}Al_xAs double heterostructure room temperature lasers grown by metalorganic chemical vapor deposition. Appl. Phys. Lett. 31, 12, p. 839 (Dec, 1977)
- 6) N. Holonyal, Jr. R.M. Kolbas, R.B. Dupuis & P.D. Dapkus: Quantumwell heterostructure lasers. IEEEJ, Quantum Electron, QE-16, 2, p. 170 (Feb, 1980)
- 7) S.D. Hersel, M. Baldy, P. Assenat, B. de Cremoux & J.P. Duchemin: A very low threshold GRIN, SCH GaAlAs/GaAlAs laser structure grown by MOCVD. 8th ECOC, Postdeadline Paper (1982).
- 8) 大武, 河野: 自己整合型 SBH 可視 高効率 半導體레이저, 應用春, 7a-H-6 (1983)
- 9) D.R. Scifres, W. Streifer, R.D. burnham, C. Lindstrom & T. Paoli: Phase-locked (GaAl) As lasers, IOOC'83, 27B2.4 (1983)
- 10) T. Inoguchi, S. Yano, T. Hijikata & Wada: Visible semiconductor lasers. IOOC' 83. 27B2.2 (1983).
- 11) A. Fujimoto, M. Shimura, S. Hinoda: InGaAsP injection lasers with wavelengths as short as 620nm at room temperature, CLEO'83, WB3 (1983)
- 12) J.J. Hsieh, J.A. Rossi & J.P. Donnelly: Room

- temperature operation of GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1 μm Appl. Phys. Lett. 28, p. 709 (June, 1976).
- 13) K. Oe & Sugiyama: GaInAsP/InP double-hetero-structure lasers prepared by a new LPE apparatus. Japan J. Appl. Phys. Vol. 15, No. 12, p. 740 (Dec, 1976)
- 14) T. Yamamoto, K. Sakai, S. Akiba & Y. Suematsu: Fast pulse behaviour of InGaAsP/InP double-hetero-structure lasers emitting at 1.27 μm , Electron. Lett. 13, P. 142 (Mar, 1977)
- 15) Y. Itaya, Y. Suematsu & K. Iga: Carrier lifetime measurement of GaInAsP/InP double-hetero-structure lasers. Japan J. Appl. Phys. 16, p. 1057 (July, 1977)
- 16) S. Akiba, K. Sakai & T. Yamamoto: In_{0.53}Ga_{0.47}As/In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} double-heterostructure lasers with emission wavelength of 1.67 μm at room temperature. Japan J. Appl. Phys. 17, No. 10, p. 1899 (Oct, 1978).
- 17) N. Kobayashi & Y. Horikoshi: 1.5 μm InGaAsP/InP d.h. laser with optical waveguide structure. Japan J. Appl. Phys. 18. No. 5, p.1005 (May, 1979)
- 18) G.D. Henshall & P.D. Greene: Low-threshold (Ga,In) (As,P) DH lasers emitting at 1.55 μm grown by LPE. Electron. Lett. 15.No. 20, p. 621 (Sept, 1979)
- 19) I.P. Kominow, R.E. Nahory, M.A. Pollack, L.W. Stuly & J.C. De Winter: Single-mode CW ridge waveguide laser emitting at 1.55 μm , Electron. Lett. 15, p.763 (Nov, 1979)
- 20) Y. Suematsu, S. Arai, F. Koyama, T. Tanbun. ek & K. Kishino: Narrow dynamic-spectral-width rapidly modulated GaInAsP/InP buried-heterostructure distributed-Bragg-reflector integrated-twin-guide lasers for 1.55 μm wide-band single-mode fiber transmission, presented at the OFC82, Phoenix (Apr, 1982)
- 21) Y. Suematsu: Recent progress in dynamic-singlemode (DSM) semiconductor lasers in long wavelength range and integrated optics, IOOC'83, 28BI-3 (1983)
- 22) H. Nomura, M. Sugimoto & A. Suzuki: High power and high temperature operation laser diode with InGaAsP/InP buried heterostructure fabricated by single step liquid phase epitaxy, in Tech. Dig. of Optical Fiber Communications, Phoenix (Apr. 1982)
- 23) M. Asada, A.R. Adams, K. Stubkjaer, Y. Suematsu & S. Arai: The temperature dependence of the threshold current of GaInAsP/InP DH lasers, IEEE, J. Quantum Electron, QE-17, No. 5, p. 611 (May, 1981)
- 24) Y. Abe, K. Kishno, T. Tanbun-ek, S. Arai, F. Koyama, K. Matsumoto, T. Watanabe & Y. Suematsu: Room temperature CW operation of 1.60 μm GaInAsP/InP buried heterostructure integrated laser with butt-jointed built in distributed-Bragg-reflection waveguide, Electron. Lett. 18, p. 77 (Jan. 1982)
- 25) T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Noguchi, U. Suzuki & T. Ikegami: cw operation of DFB-BH GaInAsP/InP lasers in 15 μm Wavelength region, Electron. Lett. 18. No. 1, p. 27 (Jan. 1982)
- 26) S. Akiba, K. Utaka, S. Saki & Y. Matsushima: Low-threshold current distributed-feedback InGaAsP/InP CW lasers. Electron. Lett, 18, p.77 (Jan, 1982)
- 27) W.T. Tsang, N.A. Olsson, R.A. Logan & J.A. Ditzenberger: A tunable single-frequency semiconductor laser: The cleaved-coupled-cavity laser and its device characteristics. IOOC'83, 29B5-4 (1983)
- 28) 柏木寛: 레이저装置와 그 應用技術의 理狀. 電氣學會技術報告 (1983)
- 29) 成萬永: 最近 光通信用 半導體素子 및 裝置의 研究開發에 관한 動向. 電氣學會誌 - 33(2) 84~96, (1984)
- 30) G.H. Olsen, C.J. Nuese and M. Ettenberg: Appl. Phys. Lett., 34 (1979) 262.
- 31) R.D. Dupis and P.D. Dakus: Appl. Phys. Lett. 32 (1978) 406.