

## 갈륨화인(GaP)을 爲主로한 各種 發光素子(LED)의 展望

金 鍾 國\*

## 1. 序 言

Light Emitting Diode(약칭 LED)란 電氣를 빛으로 變換시켜주는 半導體 素子로서 이 素子の p-n 接合體에 順方向電流를 흘려주면 빛을 發光한다. 이 LED의 特徵은 低電壓(1~2V)과 小電力(10mW 정도)으로 高輝度の 빛을 내는 동시에 小形으로 集積化(display)가 可能하며 應答速度가 빠르고 壽命이 길다는 것을 들 수 있다. 眞空管이 거의 트랜지스터로 代替된 時代가 지나가고 IC와 LSI가 출현함에 따라 全電子回路가 오늘날에 와서는 固體化 및 集積化에 이르렀고 이와 아울러 表示管도 固體化가 필요하게 되고 있다. 이에 따라 發光半導體의 特性을 응용한 表示素子는 computer와 각종 전자기기를 사용한 통신수단에 필수 불가결한 요소로서 情報交換의 役割을 담당하기에 이르렀다.

最初로 固體結晶에서 光發現象을 觀測한 것은 1923년이었는데 그 당시에는 發光에 대한 動作原理를 解得할 수 없었다. 그후 트랜지스터의 發明과 半導體의 energy band gap理論이 確立됨에 따라 發光半導體의 研究가 盛行하게 되었으며 1962년에 와서 GaAs의 p-n 接合體에서 發光效率이 높은 赤外線을 얻을 수 있었다. 그러나 유감스럽게도 GaAs의 band gap(禁止帶幅)이 1.43eV로 可視領域을 벗어난 近赤外線의 영역이었으므로 빛은 發光하나 可視광선은 아니었다. 可視光을 發光하기 위해서는 band gap이 약 1.78 eV 이상 되어야 하므로 이에 對應되는 半導體 材料를 찾게 되었으며 p-n 接合을 容易하게 形成

시킬 수 있어야 한다는 條件때문에 이러한 條件을 만족시키는 III-V族 化合物 半導體의 研究가 活潑化되고 이 結果는 오늘날 半導體의 混晶(混合結晶)의 發光現象 및 III-V族中 특히 GaP의 赤 및 綠色發光이 究明되어 市販化하게 되었다. 그런데 이러한 研究가 始作된 初期에는 이 材料들을 面積이 큰 單結晶으로 生長시키는 것이 매우 어려운 問題였었다. 1968년에 Bell 電話研究所를 爲主로한 群少會社의 研究결과 大型單結晶의 生長技術이 開發됨에 따라 1970년에 와서는 비로소 發光다이오드가 實用化 되었다. 그후 美國(Bell 電話, Monsanto, Hewlett-Packard 등)과 日本(Sony, Toshiba, NEC 등)의 各企業에서 開發을 서두려 最近 1~2年間に 材料費가 격감되었으며 量產方式이 確立化되어가는 過程으로 기존의 表示素子에 對抗하여 크게 成長하게 이르렀다

## 2. LED 材料의 種類와 特徵

LED의 發光波長은 사용된 半導體 材料의 禁止帶幅(band gap)의 크기와 p-n 接合 形成時 doping시킨 不純物에 따라 決定되며 發光效率은 band 構造와 p-n 接合의 形成方法에 따라 좌우된다. 앞서 언급한 III-V族 化合物 半導體 外에도 表 1에 보인 바와 같이 II-IV族 化合物 半導體중에도 禁止帶幅이 1.8eV( $\lambda=700\text{\AA}$ )이상 되는 것이 많아 可視發光 다이오드의 材料로 이용될 것이 기대되지만 불행하게도 CdTe를 제외하고는 不純物을 doping시켜서 p-n 接合을 形成시키는 方法이 꽤 어려운 形便이다. 간혹 傳導型이 서로 다른 것을 混晶으로 成長시켜서 p-n 接合(hetero junction)을 形成시킬 수 있지만 底溫(77°K 發光效率이 2~13%)을 제외하고는 常溫에서는 發光

\* 正會員, 한국과학기술연구소(미국 벨 연구소 근무)  
Korea Institute of Science and Technology

表 1. II-V 化合物 半導體의 禁止帶의 幅과 電氣傳導型

材 料	禁 止 帶 幅 (band gap:eV)	電氣傳導型
ZnS	3.6	n
ZnSe	2.67	n
ZnTe	2.26	p
CdS	2.41	n
ZnTe <sub>1-x</sub> Se <sub>x</sub>	2.26~2.7	n, p
Cd <sub>1-x</sub> Zn <sub>x</sub> Te	1.44~2.26	n, p
Cd <sub>1-x</sub> Mg <sub>x</sub> Te	1.44~?	—

効率が 아주 낮다. 앞으로 發光効률을 높이는 問題가 해결되면 LED의 有망한 材料로 이용될 것이 기대된다.

現在 面積이 큰 大型單結晶의 生長이 可能하고 量産이 可能한 LED 材料는 表 2에 나타낸 바와 같이 5種類를 代表的으로 들 수 있으며 모두가 III-V 族化合物 半導體이다.

GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>와 Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As는 發光効률과 電氣의 特性이 서로 비슷하며 發光하는 빛도 모두 赤色이다. 다만 GaAsP의 경우는 GaAs單結晶基板에 雜원소의 混晶을 氣相法으로 成長시키는 반면에 GaAlAs는 GaAs單結晶基板에 三元素 混晶을 液相法으로 成長시키는 것이 現在 흔히 使用되는 方法으로 p-n 接合은 모두 熱擴散法으로 不純物을 넣어 形成시킨다. GaAlAs混晶의 液相 成長에 使用되는 gallium 材料가 高價이기 때문에

Laser 다이오드나 p-n-p-n 光機能素子등 특수한 다이오드를 제외하고는 이보다 값이 싼 氣相法으로 成長시킨 GaAsP 混晶을 LED에 많이 使用한다. GaAsP 混晶은 Monsanto 및 Texas Instrument 社에 의하여 특허권이 제한되어 獨점 生産되는 形便이고 現在의 GaAsP LED 市販가격이 앞으로 더 떨어질 氣勢가 보이지 않고 있으며 最新 報道에 의하면 이 GaAsP에 질소를 doping시켜서 黃色(5900Å)을 發光하는 LED를 生産하여 곧 市場에 내놓게 되리라는 소식이다. 이에 反하여 GaP의 長點은 doping시킨 不純物의 種類에 따라 赤色내지 綠色의 빛을 낼 수 있다는 것이다. 赤色の 경우 發光 半導體중에서는 發光効率(最高發光効률 7%)이 가장 높으며 綠色(5600 Å)은 人間에게 色感度(赤色에 약 30배)가 높을 뿐 아니라 心理적으로 安定感을 주는 빛이다. 現在 綠色 GaP LED의 發光効률은 0.3% 정도이며 앞으로 發光効률을 높이는 問題와 再現性있는 均一한 빛을 내는 課題가 남아있다. GaP LED가 GaAsP LED보다 量産化가 늦어진 것은 GaP의 大型單結晶을 生長시키는 技術의 開發이 늦어진 때문이었는데 약 3年前 Liquid Encapsulated Czochralski(LEC)法으로 大型單結晶을 生長시키는 데에 成功하여 앞으로 멀지않아 GaP LED가 GaAsP LED를 입도적으로 능가할 것으로 전망된다.(그림 1 참고) 더욱 注目할만한 것은 日本 Sony 社에서 Synthesis, Solute Diffusion法(SSD)이라는 새로운 方法으로(그림 2 참고) GaP單結

表 2. 現在 量産化가 되고 있는 LED 材料의 發光波長 및 効률

LED 材料	發光波長(Å)	視感度 (lm/w)	LED 製 造 方 法	外部量子効率(%)	
				平 均 值	最 高 值
GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub> (赤)	6520(x=0.4)	75	氣相成長法+擴散法	0.1~0.2	0.2
Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As (赤)	6600(x=0.38)	55	液相成長法+擴散法	0.1~0.2	0.2
GaP	(赤) 6950	20	液相成長法	1~2	7
	(綠) 5600	600	液相成長法	0.02~0.1	0.6
赤外可視變換 GaAs LED			液相成長法		
(Y, Y <sub>b</sub> , E <sub>r</sub> )OCl (赤)	6600	20		—	1
(Y, Y <sub>b</sub> , E <sub>r</sub> )F <sub>3</sub> (綠)	5400	660*	*發光効率 10% 電流 300mA	—	0.1
(Y, Y <sub>b</sub> , T <sub>m</sub> )F <sub>3</sub> (靑)	4700	60		—	0.01
GND (赤)	6900	—	液相成長法	—	—
	7400	—		—	—

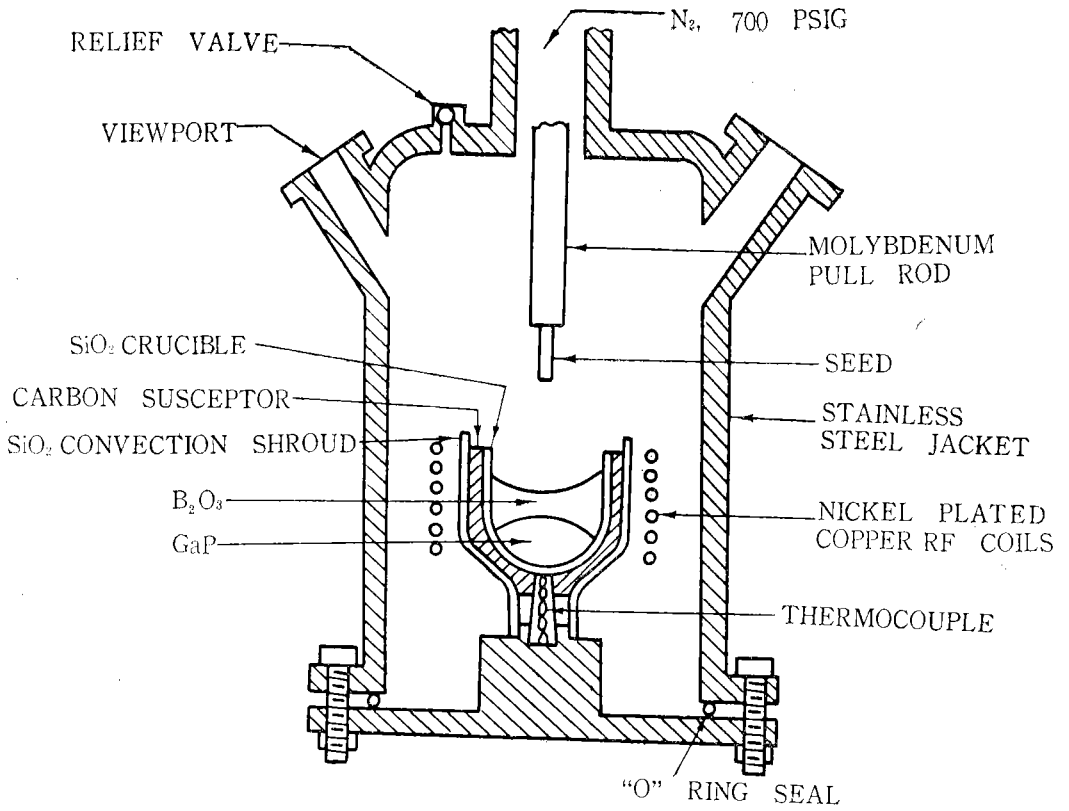


그림 1. Liquid Encapsulated Czochralski 法에 의한 GaP 單結晶生長

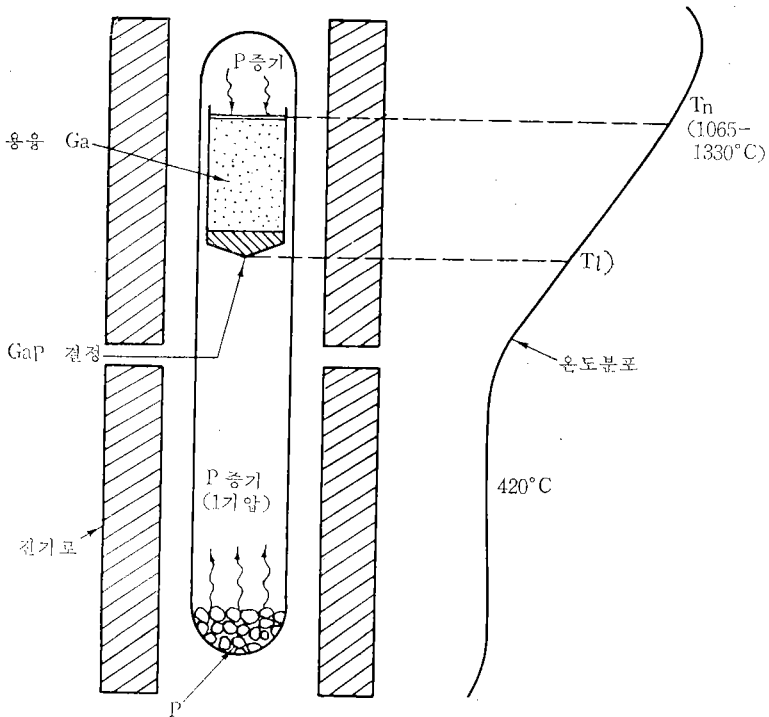


그림 2. Synthesis, Solute Diffusion 法에 의한 GaP 單結晶生長

晶을 生長시키는 方法이 考案되어 年內에는 GaP LED의 가격이 現在보다 半 이하로 하락될 것으로 내다보고 있다.

GaAs의 p-n 接合體는 赤外線을 發光하지만 表 2에 보인 赤外可視變換 材料(IR converting materials)를 接合部에 도장함으로써 可視光을 發光하는 LED를 만들수가 있다. 赤外可視變換 材料에는 赤, 綠, 靑 및 白色등이 있는데 赤外線을 可視線으로 變換시키면 効率が 낮아진다. 즉 發光強度가 赤外線強度의 2乘에 比例하기 때문에 이 LED는 낮은 電流로 動作시킬 수 없다. 例를 들어 綠色의 빛을 100fL의 밝기로 發光시키려면 50mA 이상의 電流를 흘려 주어야 하는데 GaP LED 경우는 10mA 정도면 충분하다. 이와 같이 赤外可視變換 材料를 使用하는 LED는 發光하는 빛의 色을 마음대로 바꿀 수 있지만 發光効率을

높이기 위해서는 電流의 소모가 많다는 것과 應答速度(1msec 이상)가 느리다는 것이 短點이다.

GaAs 負性抵抗 LED(GaAs negative resistance light emitting diode: 약칭 GND)은 日本의 早川 電機工業會社에서 1969年에 開發한 것으로 GaAs를 p-n-p-n 多重接合體로 만들어 負性抵抗 特性과 發光特性을 동시에 갖게한 LED이다. 發光波長의 領域은 6900Å과 7400Å인데 光 switch, 光結合回路, 光論理回路등 특수분야에 應用이 開發되고 있다.

지금까지 언급된 LED 材料 외에도 靑色빛을 내는 SiC와 GaN등이 있으며 새로운 LED 材料로서 高輝度の 빛을 發光하는 InGaP와 InAlP가 있다. SiC는 單結晶의 生長 溫度는 2000°C가 넘기 때문에 그와 같은 高溫에서 單結晶을 大型으로 成長시키기가 어렵고 GaN은 Ga와 N 原子

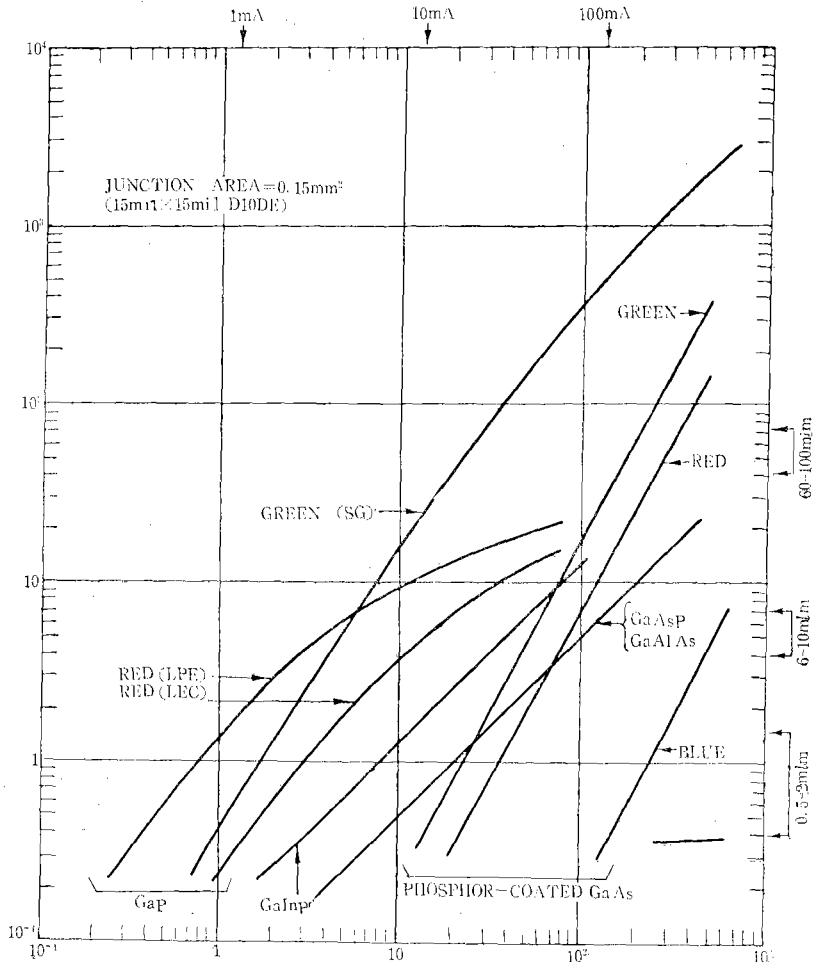


그림 3. 각종 LED의 發光効率과 順方向바이어스 電流

의 비가 Stoichiometric 하게 조성된 單結晶을 生長시키기 어려운 材料로 알려져 있다. InGaP 와 InAlP 는 現在 大型單結晶의 生長技術이 開發되고 있는 過程이므로 앞으로 이와같은 어려운 問題들이 해결되면 새로운 LED 材料로서 各광을 받게 될 것이다.

그림 3은 現在까지 알려져 있는 각종 LED 의 發光效率와 順方向 바이어스電流의 소모량을 나타낸 것이다. 이 그림에서 나타내고 있는 바와 같이 可視光을 發光하는 LED 로는 GaAsP(赤色) 과 GaP(赤色) LED 가 主流를 이루고 있는데 같은 밝기의 빛을 내는데 있어서 GaAsP LED 는 GaP LED 보다 더 많은 電流를 소모하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 GaAsP LED 는 곧 GaP LED 에 의해서 相當한 壓力을 받을 것으로 豫想되며 GaP 의 경우는 色感도가 높고 心理的으로 安定感을 주는 綠色 LED 와 表示裝置(display) 의 量産化가 實現過程에 있다.

### 3. LED 의 動作原理

LED 로써 可視光을 내기 위한 條件은 禁止帶幅(band gap)이 약 1.8eV 이상 되어야 한다고 앞서 언급했는데, 發光波長(즉 色)은 化合物 半導體의 種類와 發光中心이 되는 不純物 元素의 種類에 의해서 결정된다. 그 이유는 carrier 의 再結合時(recombination) 放出되는 energy  $\Delta E$  와 發光波長 사이에는  $\lambda(A^\circ) \approx 12400/\Delta E(eV)$ 의 관계가 있고 再結合한 energy  $\Delta E$  는 禁止帶幅과 禁止帶內에 있는 不純物 즉 發光中心에 의해서 決定되기 때문이다.

表 3은 可視光을 發光하는 LED 材料의 禁止帶幅을 나타낸 것이다. 一般的으로 半導體에는 直接遷移形(direct transition)과 間接遷移形 半導體가 있다. 直接遷移形 半導體의 경우 傳導帶(conduction band)의 最小와 價電子帶(valance band)의 最大가 運動量空間에서 같은 位置( $k=(0,0,0)$ )에 있으며 熱平衡 狀態에서 格子振動(phonon)에 상관없이 電子와 陽孔(hole)이 자유로히 發光再結合을 한다. 이 경우에는 carrier 의 運動量保存則이 自然히 만족되기 때문에 發光再結合의 確률이 높다. 그런데 유감스럽게도 直接遷移形の 半

表 3. 可視發光 LED 材料의 禁止帶幅과 遷移形態

材 料	禁止帶幅 (Eg:eV)	遷 移 形	發 光 色
GaP	2.3	間 接	赤, 綠
GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub>	1.9~2.0*	直 接	赤, (黃)
Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As	1.9*	直 接	赤
In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P	2.2*	直 接	赤~黃
In <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> P	2.3*	直 接	赤~綠
SiC	3.0	間 接	青
GaN	3.7	直 接	青

\* 直接形の 最高值

導體 中에는 可視光을 發光하는 것이 거의 없고 대부분이 赤外線을 發光하는 것 뿐이다. 그래서 연구해 낸 것이 混晶 半導體인데 GaAsP 에 있어서 GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>(0≤x≤1)의 形態로 As 와 P 의 比率를 적당히 바꾸어 赤外線이긴 하지만 發光效率이 높은 GaAs 의 直接遷移形の 性質을 남기면서 P 의 成分을 증가시켜 發光波長을 GaP 에 近接시켜 可視光을 내도록 兩者의 長點을 구비한 結晶을 만들게 된 것이다.

間接遷移形은 傳導帶의 最小( $k=(1,1,1)$  or  $(1,0,0)$ )와 價電子帶의 最大( $k=1,0,0$ )가 運動量空間에서 다른 位置에 있어서 carrier 들의 發光再結合時에는 格子振動과 不純物에 의해서 光遷移(optical transition)가 일어나는 것이기 때문에 發光再結合의 確率は 낮다. GaP 와 같이 強力한 發光中心이 되는 trap(Zn-O 혹은 Zn-N pair)을 갖고 있는 경우 運動量 制限이 풀려져서 發光確률이 높아지고 아울러 結晶內部에서는 光의 吸收가 적어서 오히려 外部로 나가는 光이 우수한 경우도 있다. 반대로 GaAsP 의 경우는 發光이 結晶內部에 쉽게 吸收되기 때문에 p-n 接合을 알게 할 필요가 있다.

LED 에 있어서 luminescence 發光過程은 勵起와 傳達의 두 段階로 되어 있다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 p-n 接合體의 禁止帶幅 Eg 에 가까운 電壓을 順方向으로 加하면 n 側 傳導帶에 있는 電子는 p-n 接合의 障壁을 뛰어 넘어 p 側에 옮겨 간다. 이때 p 領域에서는 電子의 平衡狀態보다 過

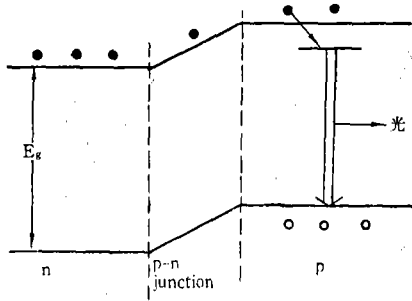


그림 4. 順方向 바이어스 電壓에 의한 p-n 接合體의 發光過程

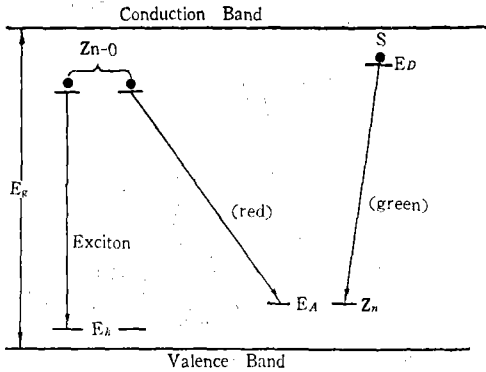


그림 5. GaP LED의 再結合 過程

剩 이므로 energy가 높은 狀態로 勵起된다. 이때에 여분의 電子가 價電子帶로 떨어지면서 價電子帶의 陽孔과 再結合하여 빛을 내게 된다. (傳達) GaP의 경우를 예들들어 설명하면, Zn-O(赤色)와 Zn-N(綠色) pair가 傳導帶 바로 밑에 trap을 형성하고 이 trap이 傳導帶의 電子에 의해서 charge된 다음 價電子帶 바로 위에 있는 陽孔과 再結合(exition發光)하는 복잡한 과정으로 이루어진다. 이를 그림 5에 표시한다.

赤外可視變換 材料의 發光是 多段階 勵起現象으로 說明되고 있다. 다수의 낮은 energy를 갖고 있는 photon들이 합쳐서 높은 energy를 갖는 photon으로 變換하는 것으로서 구체적으로는 몇 단의 勵起準位를 가진 發光中心이 그 準位間的

energy에 해당하는 photon을 照射하여 順次的으로 各段의 勵起와 吸收을 되풀이해서 마치 사다리를 올라가는 것과 같이 電子의 energy를 높은 準位로 올려놓고 그 電子를 한번에 基底單位로 再結合시켜서 그때에 나오는 光放射를 얻는 방법이다. 예들들어 YOCl系에 있어서 入力段에는 Yb<sup>+3</sup>를, 중폭단에는 Er<sup>+3</sup>를 추가로 사용한 경우를 설명하면 다음과 같다. 赤外線光을 Yb<sup>+3</sup> ion이 흡수하여 흡수한 energy를 다시 Er<sup>+3</sup> ion의 두 energy準位에 전달시켜서 5200Å과 5400Å의 綠色을 發光하게 된다.

#### 4. LED 材料의 製造方法

지금까지 언급된 LED 材料들의 p-n 接合體는 積層成長(氣相 및 液相)法和 熱擴散法에 의해서 不純物을 doping시켜서 形成시킬 수 있다. 그런데 積層成長方法으로 p-n 接合體를 形成시키는 경우 LED의 發光效率은 높아지나 應答速度(약 500msec)가 느려지는 경향이 있으며 熱擴散方法으로 p-n 接合體를 形成시킬 때에는 이와 반대로 應答速度는 빨라지나 發光效率은 아주 낮아진다. 그러므로 특수한 LED의 製造를 제외하고는 發生效率이 높은 LED를 製造하기 위해서 一般的으로 積層成長 方法을 많이 使用한다.

GaAsP 材料는 n型 GaAs 單結晶 基板위에 氣相積層成長法(vapor phase epitaxial growth)으로 二元素 混晶을 成長시킨다. 이때 反應物質은 Ga+AsCl<sub>3</sub>+PCl<sub>3</sub>+H<sub>2</sub>, Ga+AsH<sub>3</sub>+PH<sub>3</sub>+HCl+H<sub>2</sub>, Ga+PCl<sub>3</sub>+As+H<sub>2</sub>의 경우인데 成長시킨 GaAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> 混晶은 n型이며 여기에 p型 不純物인 Zn를 擴散시켜서 p-n 接合體를 만든다. 이때 x=0.4 이하에서는 直接遷移形으로 發光效率이 크지만 x=0.4이상일 때에는 間接遷移形으로 바뀌어서 發光效率이 감소된다는 것이 특기할만한 사실이다.

GaAlAs 材料는 電氣爐의 石英反應管 속에 놓여 있는 흑연 boat의 한쪽에 n型 GaAs 基板을 놓고 다른 쪽에는 Ga+GaAs+Al source를 넣어 H<sub>2</sub>가스 분위기에서 포화용액을 만든 다음 이 포화용액이 基板위에 적셔지도록 tipping한 후 溫度를 서서히 冷却시키면 포화용액 속에 GaAsAl이 석출되어 基板위에 積層成長層을 만든다. 이

方法으로 成長시킨 n型  $Ga_{1-x}Al_xAs$  混晶에 p型 不純物인 Zn를 擴散시켜서 p-n 接合體를 만든다. 이때 Al의 첨가량에 따라 發光波長이 變化하는데 一般的으로  $x=0.38$  정도가 되도록하여  $6600 \text{ \AA}$ 의 빛을 내도록 하고 있다.

GaP 材料는 赤色인 경우 n型 GaP 單結晶 基板에다가 p型 不純物인 Zn와 산소를 첨가한 Ga+GaP 용액 속에서 液相(lipuid phase epitaxial growth)으로 成長시켜서 p-n 接合體를 만들며 이때 산소의 source로는  $Ga_2O_3$ 를 使用한다. 綠色인 경우는 산소 대신 질소를 doping시키는데 질소의 source로는  $NH_3$ 가스를 使用한다. GaP의 p-n 接合體를 形成하는데 있어서 Zn-O와 Zn-N pair의 濃도가  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  이상 되는 것이 이상적인데 실제로는 산소와 질소가 잘 doping되지 않기 때문에 많이 doping시키기 위해서는 고도의 成長技術이 요구된다. LEC 方法으로 生長시킨 GaP 單結晶을 基板으로 使用할 경우 結晶內에 格子缺陷이 많아서 發光效率이 낮아지므로 基板에 液相으로 n型層을 한번 더 成長시킨 다음 p型層을 成長시킴으로써 發光效率을 높인다. 그러나 SSD 方法으로 生長시킨 結晶은 單結晶形成速度가 느리기 때문에 格子缺陷이 현저하게 감소되어서 바로 p型層만을 成長시키도 發光效率은 LEC 기판 위에 二重層生成時의 發光효율에 해당하는 빛을 낸다고 보고되었다. SSD 方法은 結晶의 生長速度가 너무 느려서 量産化時에는 빠르게 改良하든가 結晶面積을 더 크게(직경이 2inch 이상) 함으로써 LED의 量産이 가능하도록 해야 할 것이다. 이외에도 發光效率을 높이기 위한 方法으로서 液相으로 成長된 p-n 接合體를 數시간 내지 數拾시간 동안 열처리를 함으로써 3배이상의 效率을 높일 수가 있는데 앞서 언급한 GaP LED의 경우 7% 效率은 이 方法으로 얻어진 結果이다.

GaAs p-n 接合體에 赤外光視變換材料를 도장한 LED에 있어서 GaAs p-n 接合體는 熱擴散法과 液相積層成長으로 形成시키며 앞서 언급한 方法과 비슷하므로 생략한다. 赤外可視變換材料로 赤色은( $Y_{0.74}, Yb_{0.25}, Er_{0.01}$ ) OCl, 綠色은( $Y_{0.84}, Yb_{0.15}, Er_{0.01}$ )  $F_3$ , 青色은( $Y_{0.65}, Yb_{0.35}, Tm_{0.001}$ )  $F_3$ 를 使用한다. 이 材料들은 化學反應을 시켜서

製造하는데 赤色材料의 경우를 例로 설명하면 다음과 같다. 휘토루 금속의 산화물인  $Y_2O_3, Yb_2O_3, Er_2O_3$ 를 HCl 용액에 넣어 끓이면서 化學反應을 시킨 다음  $500 \sim 600^\circ C$ 의 온도로 2시간정도 加熱시켜서 얻는다. 이때 Y, Yb, Yr, Tm의 첨가 비율에 따라 發光波長이 달라지는데 赤色은  $6600 \text{ \AA}$ , 綠色은  $5400 \text{ \AA}$ , 青色은  $4700 \text{ \AA}$ 의 빛을 내도록 첨가비율을 정한다.

GND의 p-n-p-n 多重接合體의 成長은 rate growth 方法으로 단 한번의 液相積層成長 과정으로 이루어진다. Ga+GaAs+Al에 p型 不純物인 Zn와 n型 不純物인 Te을 함께 첨가시키고 成長시키는데 Zn와 Te은 冷却速度에 따라 摺折係數가 달라지므로 冷却速度를 조절함으로써 연속적으로 p-n-p-n 接合을 成長시킬 수가 있다.

## 5. LED를 이용한 表示裝置

電子回路가 集積化됨에 따라 在來式 表示管 대신 半導體 表示裝置가 要求되고 이에 따라서 그 用途는 多樣 多彩롭다. 現在 市場性이 第一 좋은 것은 亦是 휴대용 電子計算機라고 하겠다. 小型이어야 할 뿐 아니라 電力소모가 적어서 電池의 교환을 빈번히 안해야 되고 충격에 견딜 수 있고 수명이 길다는 點 등등을 羅列하면 가장 알맞은 利用途라 보겠으며 앞으로 需要는 急增할 단계이며 이 方面의 量産化가 國內에서도 時急하다 赤色 8-Digits 계산기도 중요하지만 이를 綠色으로 바꾸면 더욱 좋을 것은 이미 前述한 바 있다. 最近 Electronics誌를 爲始하여 각종 報도를 보면 LED의 現 生産의 需要의 10분의 1도 따라가지 못하는 實情이라 한다. 用途로선 Pilot Lamp로서 각종 機器의 indicator 用으로 要求가 많고, 비행기의 조종사 Panel의 각종 表式계기의 LED化가 이룩되어 時速, 비행高度, 연료在庫量, 각종 기기의 定常 가동여부의 사전 傳達등에 쓰이고 自動車 운전대의 각종 계기 및 시계, 운전시간, 운전거리등 多樣으로 利用될 단계이다. 또한 近代生活에 거의 必須物인 電話器의 表示, 교환기의 동작표시 장거리 통신의 각종 계기의 表示등도 廣汎한 利用途의 一斷面을 나타내고 있다. 以上 몇가지 用途를 明記했으나 이외의 數많은 用途는

현명한 독자의 想像에 맡기기로 한다.

## 結 言

發光素子(Light Emitting Diode: LED)全般에 관한 過去 6~7年間の Review를 制限된 原稿에 細密히 옮긴다는 것은 꽤 어려운 일이다. 또한 時時 刻刻으로 變遷改良되는 LED의 量產過程 및 市場 추세를 記錄키도 역시 어려운 일이다. 그러나 우리나라에서 最初로 GaP의 發光素子が 우리科學徒의 손으로 이룩된 것을 계기로 概略的인 Review를 試圖했다. 紹介에 不適當인 Review가 된 듯하여 著者로서 부끄러운 마음이 앞서고 좀 더 時間을 注入하여 讀者의 期待에 呼應되는 Review를 못 쓴 것을 유감스럽게 생각한다. 되도록이면 쉽게 풀이를 한 Review가 좋다는 編輯人의 要請도 있어서 이것을 一種의 변명으로 삼아볼까 한다. LED에 關心을 가진 분을 위하여 벨연구소의 Casey 및 Trumbore의 Review Article을 권하고 싶으며 그네들의 參考文獻(Reference)를 여기에 게재한다.

## 參 考 文 獻

1. O. W. Lossev, *Telegrafiai Telefonía*, 18 (1923) 61.
2. G. A. Wolef, R. A. Herrert and J. D. Broder, *Phys. Rev.*, 100(1955) 1144.
3. R. Braunstein, *Phys. Rev.*, 99 (1955) 1892.
4. J. I. Pankove and M. Massoulié, *Electro. Div. Abstr.*, Spring Veeting Electrochem. Soc., Los Angeles' 1962. p. 71.
5. R. J. Kiyes and T. M. Quist, *Proc. IRE*. 50 (1962) 1822.
6. M. Girshenzon, *IRE. Trans. Electron Derices*, ED9 (1962) 503.
7. D. N. Naseedov, A. A. Rogachev, S. M. Ryvkin and B. V. Tsarenrov, *Soriet Phys-Solid State*. 4(1962) 782; transluted from *Fiz. Tered, Tcht.* 4 (1962) 1002.
8. T. M. Quest, R. J. Keyes, W. E. Krag, T. Lax, A. L. McWhorter, R. H. Rediker and H. J. Zeiger, *Appl. Phys. Letters*. 1(1962) 91.
9. M. I. Naihán, W. P. Dumre, G. Burns, E. H. Dill and G. Lasher, *Appl. Phys. Letters*, 1(1962)

- 62.
10. R. N. Hael, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys and R. O. Carison, *Phys. Rev. Letters*. 9 (1962) 366.
11. H. K. Hensch, *Electroluminescence*. Pergamon Press. New York. 1962. p. 112.
12. M. Aven and J. S. Prener (eds.), *Physics and Chemistry of H. VI Compounds*. Wiley, New York, 1967.
13. J. A. Van Vecheen, *Phys. Rev.*, 187(1969) 1007.
14. M. Gerhenzon, in P. GoldberP (ed.), *Luminescence of Inorganic Solids*. Academic Press. New Yorks. 1966, p. 603.
15. M. Gershenson, in R. K. Willardson and A. C. Beer (eds.), *Semiconductors and Senrimetals. Physics of III-V Compounds. Vol. 2*, Academic Press, New York, 1966. p. 289.
16. M. I. Nathan, *Appl. Optics*, 5 (1966) 1514.
17. M. R. Lorenz, *Science*. 159 (1968) 1419.
18. M. R. Lorenz, *Trans. AIME*. 245 (1969) 539.
19. P. J. Dean, in R. Wolee and C. J. Kriessman (eds.), *Appl. Solid State Science. Vol. 1*. Academic Press. New York. 1969. p. 1.
20. P. T. Landsberg, *Solid-State Electron.* 10(1967) 513.
21. Y. P. Varshni, *Phys. Status Solidi*, 19 (1967) 459.
22. Y. P. Varshni, *Phys. Status Solidi*, 20(1967) 9.
23. D. G. Thomas, *Brit. J. Appl. Phys.*, 2 (1969) 637.
24. F. Williams, *Phys. Status Solidi*, 25(1968) 4, 3.
25. Review L. G. Bailey, *Trans. AIME*. 239(1967) 310.
26. C. D. Thurmond, *J. Phys. Chem. Solids*. 26 (1965) 785.
27. See for example, B. Segallis, *Elec. Prod.*, 12 (June 1969) 28. and A. A. Bergh and B. H. Johnson, *Bell Labs. Record*, 47 (1969) 320.
28. J. C. Phillips, *Phys. Rev.*, 112 (1958) 685. A recent presentation of the pseudopotential method is W. A. Harrison, *Pseudopotentials in the Theory of Metals*. Benjamin, New York, 1966.
29. J. C. Phillips, *Phys. Rev. Letters*. 20(1968) 550.
30. J. A. Van Vecheen, *Phys. Rev.*, 182(1969) 891.



32. F. Herman. *J. Electronics.* 1(1955) 103.
32. J.C. Phillips and J.A. Van Vechten, *Phys. Rev. Letters.* 22(1969) 705.
33. M.L. Cohen., and T.K. Bergstresser: *Phys. Rev.*, 141 (1966) 789.
34. C. Kheel., *Introduction to Solid State Physics.* Wiley. NewYork. 3rd edn., 1968.
35. A.G. Thompson, M. Cardona, K.L. Shaklee and J.C. Wooleey. *Phys. Rev.*, 146 (1966) 601.
36. I. Baislev, *Phys. Rev.*, 173 (1968) 762.
37. M.G. Craford. G.E. Shllman, J.A. Rossi and N. Holonyak. Jr., *Phys. Rev.*, 168 (1968) 867.
38. P.J. Dean anP D.G. Thomas. *Phys. Rev.*, 150 (1966) 690.
39. M.R. Lorenz. G.D. Pettit and R.C. Taylor. *Phys. Rev.*, 171(1968) 876.
40. M.R. Lorenz, W. Reuter. W.P. Dumke, R.J. Chicotka. G.D. Pettit and J.M. Woodall, *Appl. Phys. Letters*, 13 (1968) 421.
41. H.C. Casey, Jr. and M.B. Panish. *J. Appl. Phys.*, 40 (1969) 4910.
42. J.A. Van Vecheen and T.K. Bergstresser. *Phys. Rev. B* 1 (1970) 3351.
43. S.V. Galginaitts and G.E. Fenner, *GaAs: 1968 Symp. Proc., Inst. of Phys. and Phys. Soc., London, 1969.* p.131.
44. K.G. Hambleton, C. Husum and B.R. HoLeman, *Proc. Phys. Soc. (London).* 77(1961) 1147.
45. Q.H. F. Verhen, *J. Phys. Chem. Solids*, 29 (1968) 129.
46. B.I. Halperin and M. Lax, *Phys. Rev.*, 148 (1966) 722.
47. D.A. Cusano, *Solid State Comm.*, 2(1964) 353.
48. C.J. Hwang. personal communications.
49. G. Lasher and F. Stern. *Phys. Rev.*, 133(1964) A553.
50. W. Van Roosbroeor and W. Shockley, *Phys. Rev.*, 94(1954) 1558.
51. P.J. Archer and D. Kerps, *GaAs: 1966 Symp. Proc., Inst. of Phys. and Phys. Soc., Lendon, 1967,* p.103.
52. G. Lucovsky, A.J. Varga and R.F. Schwarz, *Solids States Comm.*, 3(1965)
53. H.Rupprch. M. Woodall, K. Konnerth and D.G. Pettit. *Appl. Phys. Letters*, 9(1966) 221.
54. K.L. Ashley and H.A. Strack, *GaAs: 1968 Symp. Proc., Inst. of Phys. and Phys. Soc., London, 1969,* p. 123.
55. C.M. Wolee, N. Holonyak, Jr., C.J. Nuese, G.E. Stielman. M.D. Sirkis and D. Hill. *J. Appl. Phys.*, 37(1966) 434.
56. A.H. Herzog, W.O. Groves and M.G. Craford, *J. Appl. Phys.*, 40(1969) 1830.
57. D.E. Gray(ed.). *Am. Inst. of Phys. Handbook,* McGrawHill, New York. 1993, p.6-139.
58. H. Rupprecht. J.M. Woodall and G.D. Pettit, *Appl. Phys. Letters.* 11(1967) 81.
59. J.M. Woodall. H. Rupprecht and W. Reuter, *J. Electrochem. Soc.*, 116(1969) 899.
60. J.M. Woodall, personal communication.
61. I. Hayashi and M.B. Panish. *J. Appl. Phys.*, 41(1970) 150.
62. H. Nelson and H. Kressel., *Appl. Phys. Letters.* 15(1969) 7.
63. J. Starkiewicz and J.W. Allen. *J. Phys. Chem. Solids.* 23(1962) 881.
64. M. Gershenson, F.A. Trumrore, R.M. Mikulyak and M. Kowalchik, *J. Appl. Phys.*, 36(1965) 1928.
65. T.N. Morgan, B. Welber and R.N. Bhargava, *Phys. Rev.*, 166(1968) 751.
66. G.H. Henry, P.J. Dean and J.D. Cuthbert. *Phys. Rev.*, 166(1968) 754.
67. E.E. Williams. *J. Phys. Chem. Solids.* 12(1990) 265.
68. D.G. Thomas. M. Gershenson and F.A. Trumeore, *Phys. Rev.*, 133(1964) A269.
69. J.D. CuthBert, C.H. Henry and P.J. Dean, *Phys. Rev.*, 170(1968) 739.
70. R.N. Bhargava, personal communication.
71. P.J. Dean, personal communication. (Sec Table 5.)
72. J.D. Wiley, personal communication.
73. J.M. Dishman and M. DiDomenico, *Phys. Rev. B* 1(1970) 3381.
74. W. Rosenzweig, W.H. Hackett, Jr., and J.S. Jayson, *J. Appl. Phys.*, 40(1969) 4477.
75. J.M. Dishman, personal communication.
76. M. Gershenson, R.A. Logan and D.E. Nelson, *Phys. Rev.*, 149(1966) 580.

77. W.H. Hackett, Jr., W. Rosenzweig and J.S. Jayson. Proc. IEEE. 57(1969) 2072.
78. R.H. Saul, J. Armstrong and W.H. Hackett, Jr., Appl. Phys. Letters, 15(1969) 229.
79. P.J. Dean, M. Gershenson and G. Kaminsky, J. Appl. Phys., 38(1967) 5332.
80. R.A. Logan, H.G. White and W. Wiegmann, Appl. Phys. Letters, 13(1968) 139.
81. R.A. Logan, H.G. White and W. Wiemann, pape presented at the Conf. on Solid State Devices, Exeter, England, 1969.
82. R.A. Logan, personal communication.
83. G.F. Rholuyanov, Soviet Phys., -Solied State, 6 (1965) 2668: iranslated from Fiz. Trerd. Tela, 6(1964) 3336.
84. R.M. Potter and D.A. Gusano: J. Electrochem, Soc., 114(1967) 848.
85. R.M. Potter. J.M. Blank and A. Addamiano, J. Appl. Phys., 40(1969) 2253.
86. R.L. Scace and G.A. Slack, in J.R. O'Connor and J. Smilens(eds.). Conf. on sic, Boston, 1959, Pergamon Press, New York, 1960, p. 24.
87. H.E. Henisch and R. Roy(eds.), Intern. Conf. Silicon Carbide, 1968, Pergamon Press, New York, 1969.
88. R.K. Willardson and H.L. Goering(eds.). Compound Semiconductors, Vol. I: Preparation of III-V Compounds, Reinhold, New York, 1962.
89. R.N. Hall, J. Electrochem, Soc., 110(1963) 385.
90. W. Röster and B. Thoma, Z. Metallk., 46(1955) 291.
91. M. Rubenstein, Electron. Div. Abstr. of the Electrochem. Soc , 11(1962) 199.
92. D. Richman. J. Phys. Chem. Solids, 24(1963) 1131.
93. J.R. Ariher. J. Phys. Chem. Solids, 28(1967) 2257.
94. W.D. Johnson, J. Electrochem. Soc., 110(1963) 117.
95. M.B. Panish, personal communication.
96. M.B. Panish and H.C. Casey, Jr., J. Phys. Chem. Solids, 28(1967) 1673.
97. M.B. Panish and H.C. Casey, Jr., J. Phys. Chem. Solids, 29(1968) 1719.
98. C.J. Erosch and G.S. Rao, unpublished.
99. H.G. Grimmeiss, W. Kichio and H. Scholz, Philips Tech. Rev., 26(1965) 136.
100. D.G. Thomas, J.J. Hopfield and C.J. Frosch, Phys. Rev. Letters, 15(1965) 857.
101. D.G. Thomas and J.J. Hopfield. Phys. Rev., 150(1966) 680.
102. P.J. Dean. C.J. Frosch and C.H. Henry, J. Appl. Phys., 39(1968) 5631.
103. C.J. Frosch. J. Electrochem. Soc., 111(1964) 180.
104. J.M. Weian and G.H. Wheatley, J. Phys. Chem. Solids, 6(1958) 169.
105. J.M. Wheian. J.D. Struthers and J.A. Ditzenberger, in H.C. Gatos(ed.). Properties of Elemental and Compound Semiconductors. Vol. 5. Interscience, New York, 1960, p.141.
106. L.R. Weisberg. F.D. Rose and P.G. Herkart, in H.C. Gatos(ed.). Propertics of Elemental and Compound Semiconductors, Vol. 5. Interscience, New York, 1960, p. 25.
107. J.M. Woodall, Trans. AIME, 239(1967) 378.
108. R. Gremmelmaier, z. Naturforsch., 11a(1958) 511.
109. P.L. Moody and C. Kolm, Rev. Sci. Instr., 29 (1958) 1144.
110. G.R. Cronin. M.E. Jones and O. Wilson, J. Electrochem. Soc., 110(1963) 582.
111. E.P.A. Metz, R.C. Miller and R. Mazelsky, J. Appl. Phys., 33(1962) 2016.
112. f.B. Mullin, B.N. Straughan and W.S. Brickell, J. Phys. Chem. Solids, 26(1965) 782.
113. J.F. Miller, in R.K. Willardsen and H.L. Goering (eds.). compound Semiconductors, Vol. 1. Preparation of III-V Compounds, Reinhold, New York, 1962, p. 194.
114. C.J. Frosch, and L. Derick, J. Electrochem. Soc., 108(1961) 251.
115. L. Derick, personal communication.
116. S.E. Blum and R.J. Chicotka, J. Electrochem. Soc., 115(1968) 298.
117. J.B. Mullin, R.J. Heritach, C.H. Holliday and B.W. Straughan, J. Crystal Growth, 3,4(1968) 281.
118. S.J. Bass and P.E. Oliver, J. Crystal Growth,

- 3,4(1968) 286.
119. L.M. Foster, T.S. Plaskett and J.E. Sardeheld, IBM J. Res. Develop., 10(1966) 114.
120. A.S. Jordan, Ext. Abstr. Spring Meeting Electrochem. Soc., Los Angeles, 1970, p. 372.
121. M.B. Panish, J. Electrochem. Soc., 113(1966) 861.
122. F.A. Trumbore, H.G. Whitte, M. Kowalchik, R.A. Logan and C.L. Luke, J. Electrochem. Soc., 112(1965) 782.
123. L.L. Chang and G.L. Pearson, J. Appl. Phys., 35(1964) 374.
124. R.N. Hall and J.H. Rachtte, J. Appl. Phys., 35(1964) 379.
125. Y. Furukawa and C.D. Thurmond, J. Phys. Chem. Solids, 26(1965) 1535.
126. G. Schottky, J. Phys. Chem. Solids, 27(1966) 1721.
127. H.Kressel., F.Z. Hawryo, M.S. Abrahams and C.J. Buiocchi, J. Appl. Phys., 39(1968) 5139.
128. L.J. Vieland and I. Kudman, J. Phys. Chem. Solids, 24(1964) 437.
129. M. Gershenson, F.A. Trumbore, R.M. Mikulyak and M. Kowalchik, J. Appl. Phys., 37(1966) 483.
130. K.P. Sinha and M. DiDomenico, Jr., Phys. Rev. B, 1(1970) 2623.
131. L.M. Foster and J. Scardefield, J. Electrochem. Soc., 116(1969) 494.
132. L. Derick and S.E. Haszko, personal communication.
133. W.H. Hackett, Jr., personal communication.
134. C.K. Kim, personal communication.
135. M.R. Lorenz and M. Pilkuhn, J. Appl. Phys., 37(1966) 4094.
136. H.Nelson, RCA Rev., 24(1963) 603.
137. R.A. Logan, H.G. White and F.A. Trumbore, Appl. Phys. Letters, 10(1967) 206.
138. A. Onton and M.R. Lorenz, Appl. Phys. Letters, 12(1968) 115.
139. F.A. Trumbore, M. Kowalchik and H.G. White, J. Appl. Phys., 38(1967) 1987.
140. K.K. Shih, M.R. Lorenz and L.M. Foster, J. Appl. Phys., 39(1968) 2747.
141. H.A. Allen and G.A. Henderson, J. Appl. Phys., 39(1968) 2977.
142. I. Ladany, J. Electrochem. Soc., 116(1969) 993.
143. W.H. Hackett, Jr. and D.L. Scharfetter, personal communication.
144. R.H. Saul and W.H. Hackett, Jr. Ext. Abstr. Spring Meeting Electrochem. Soc., Los Angeles, 1970, p. 220.
145. W.G. Sphzer and M.B. Panish, J. Appl. Phys., 40(1969) 4200.
146. M.B. Panish and S. Sumski, J. Appl. Phys., in press.
147. F.E. Roxztochy, Electron. Div. Abstr. of the Electrochem. Soc., 17(1968) 516.
148. M.B. Panish, J. Electrochem. Soc., 113(1966) 1226.
149. M.B. Panish and S. Sumski, J. Phys. Chem. Solids, 30(1969) 129.
150. M. Ilegems and G.L. Pearson, GaAs: 1968 Symp. Proc., Inst. of Phys, and Phys. Soc., London, 1969, p.3.
151. J.J. Tietjen and J.A. Amick, J. Electrochem. Soc., 113(1966) 724.
152. W.F. Finch and E.W. Mehal, J. Electrochem. Soc., 111(1964) 814.
153. J.W. Buro, Trans. AIME, 245(1969) 571.
154. R.A. Burmeister, Jr., G.P. Pighini and P.E. Greene, Trans. AIME, 245(1969) 587.
155. N.E. Schumaker, personal communication.