

工學博士 成 英 權*

(Young Kwon-Sung)

〔I〕電子材料의 새로운 傾向

(最近의 electronics 의 方向)

1. 緒 言

電子의 各種現象을 利用하여 人間活動의 時間的, 空間的範圍를 擴大해 가는 技術이 electronics 이다. 오늘날에 있어서는 electronics 의 進歩는 過去의 어떠한 科學技術의 進歩보다도 急速하고, 所謂 技術革新의 尖兵으로서의 役割을 하면서 如前히 急速한 發展을 繼續하고 있다. 따라서 이러한 electronics 의 全貌를 파악하기는 대단히 곤란하다. 그중 重要한 促進役割劑로서는 두 말할 것 없이 部品과 材料의 進歩가 있어야 한다. 새로운 材料의 開發이 새로운 部品을 내고, 새로운 機能, 回路, 機器에 對한 要求가 새로운 材料, 部品을 生産해 나가는 發展過程을 흔히 볼 수 있다. 가령 眞空管을 대신하여 출현한 transistor 가 이때까지의 部品の 現狀 寸수 性能에 현저한 變化를 가져다 주었으며, 從來 要求되어 왔던 라디오 Television 通信機等의 portable 性이 可能해 졌고, Rader 의 開發에서 始作하여 超高周波에의 挑戰이 드디어 Laser 로 進展되어, 從來의 通信方式을 크게 變換 시키려하고 있으며, 또 電子計算機는 거의 모든 分野의 企業에 利用되어 技術事務의 兩面에 人間의 能力을 超越하는 重要한 貢獻을 하고 있다.

이와같은 發展의 根底에는 材料部品の 進歩가 있고, 새로운 現象, 原理의 發見에 依하여 支持되어 있다. 특히 Ge, Si 을 爲始하여 半導體研究에 物理學 特別 固體物性物理가 寄與한바는 크고, 其他 材料에 對해서도 物性論的研究가 대단히 왕성해서, 材料의 進歩를 促進시키고 있다.

따라서 現在는 各種物質中의 電子 energy 狀態를 自由를 制禦하고, 그 energy 差에 依한 energy 의 흐름을 利用하는 技術이 發展되어 있다고 볼 수 있으며, 量子論의 立場에 立脚한 electronics 라고 할 수 있다. 이러한 electronics 에 있어서의 部品 및 材料에 對해서 새로운 傾向 오늘날의 움직임을 살피고, 아울러 모든 電子材料를 物性論의 考察해보기로 한다.

2. 小型化

(i) 電子回路의 全 transistorization

(ii) 回路部品の 小型化

(iii) 組立의 自動化

(iv) 回路의 block 化

電子回路의 全 transistorization 을 爲해서는 transistor 의 大電力化와 高周波, 超高周波에의 使用周波上限의 擴張이다. 最近 5인치 텔레비전, 150MC 携帶無線機等의 出現은 transistor 의 性能向上에 의하여 비로소 可能하게 된 것이다. 現今 transistor 의 周波數上限은 1000 MC 程度 또 出力은 10W 程度이지만, 이線을 넘어서기 위해서는 대단히 어려운 問題를 處理하는가 또는 다른 原理材料에 依한 것을 생각하지 않으면 안된다.

第二에 있어서의 回路部品の 小型化는 위에 말한 transistor 의 寸수에 알맞은 回路部品の 小型化와 그 製造工程, 組立工程의 機械化를 위한 寸수의 基準化이다. 종래에 眞空管回路部品과 transistor 回路部品과의 最大相違點은 使用電壓의 問題였다. 使用電壓의 大幅低下는 部品の 耐壓減少와 低電力使用에 알맞게 되고, 이로 인하여 部品寸수의 減少가 현저하게 되었다. 그러나 기준화된 것은 없고, 거의 各 set 에 필요한 最小寸수의 것 을 만드는데 불과하였다.

第三의 組立의 自由化는 量産에 대한 合理化로서 우선 組立의 機械化를 들을 수 있다. 물론 回路部品の 基準化가 전제조건이며, 各部品の 寸수精度의 向上이 必須條件이지만, 機械化에 의하여 生産量의 增大를 期하여, 極力 costdown 을 고려하고, 機械의 小型化와 아울러 從來部品보다 性能, 價格點에서 有利한 狀況으로 이끌어 가는것이 電子工業 發展을 위해서라도 꼭 필요하다.

다음은 回路의 block 化인데, 현재 複雜화된 電子回路 system 을 뚫 수 있는 Compact 化하고, 또는 電子機器를 小型輕量으로 하기 爲하여 여러가지 方式에 의한 研究開發이 進行되고 있다. 即 例를 들면 各回路部품을 超小型으로, 그리고 同一寸수로 하고, 이것을 종합해서 一般回路 block 을 구성하는 것, 또는 基準寸수의 基板 위에 薄膜狀部품을 必要面만 蒸着 또는 다른 方法으로 內包시켜, 平板狀回路 block 를 구성하는 方式, 또는 半導體基板을 사용한 固體回路方式等 여러가지 방식이 취해지고 있다. 이들의 특징은 從來回路는 部品에 의하여 構成되어, 各回路素子가 獨立된 構成素體였는데 비해, 單位回路 그 자체가 독립된 構成素體를 이루고 있다는

* 高麗大學校 理工大學 教授 正會員

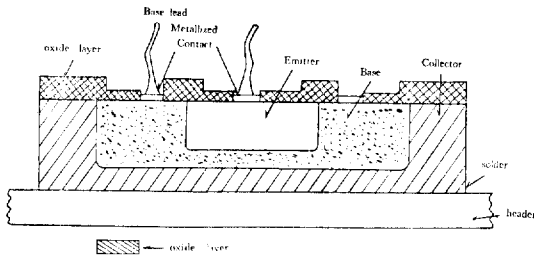
것이다. 따라서 交換單位가 部品에서 回路에 移行된 셈이다.

3. 超小型化的 現狀

이때까지 電子回路의 變遷과 그 組立方法, 構成方法의 變化 및 그것에서 나타나는 새로운 경향을 대략 말하여 왔으나, 現狀에 있어서 部品 그自體의 一般의傾向은 다음과 같다.

- i) 小型化에서 더욱 超小型化로
- ii) 高規格化 및 高信賴度
- iii) 部品の 半導體化와 薄膜化

即 形狀의으로는 보다 小型化로, 性能의으로는 高規格, 高信賴度로 機械的으로는 薄膜化와 半導體化되어가는 경향을 보이고 있다. 그중에 특별히 현저한 것은 小型化의 一方法으로서 蒸着 sputtering 等の 技術에 의해 導體, 抵抗, condenser 는 물론 磁性材料의 薄膜化, 半導體材料의 薄膜化가 可能케 되어, 回路의 平面化를 위한 技術이 현저하게 발전되었다. 특히 限界에 있던 從來部品の 小型化의 새로운 展開를 생각하여, 形狀, 材料의 變化를 탐구한 결과 나타난 蒸着方式(半導體製作 技術中の Planar 型의 導入과 Epitaxial growth 의 應用等)을 主體로 한 超小型化方式이 많이 나타났다. 그러나 主로 眞空中의 蒸着이고, 精密加工技術이 요구되기에 量産性이 결핍된다. 앞으로 自動制御, programming control 等に 依한 製造裝置의 進歩에 따라 곧 해결될 것이라고 생각한다.



[그림 1] Planar 型 製品

이 超小型化의 定義에 따르면, 현재 세가지의 主要方式이 취하여지고 있다. 即

- i) 從來部品에 依한 高密度格納方式
- ii) Ceramic 基板을 使用한 module 方式
- iii) 半導體를 利用한 固體回路方式으로

i)의 경우는 벌써 이용되고 있고, ii)의 module 方式은 지금 대부분 開發中에 있으며, 일부가 商品化에 拍車를 가하고 있는 中이며, iii)의 固體回路方式은 많은

制約을 받아서, 特殊回路를 제하고는 開發 또는 연구도 상에 있다.

이하 超小型方式의 몇가지 代表例의 概要를 간단히 설명하고자 한다.

(i) Micro module

RCA 方式의 商品名으로서, 小型으로된 抵抗이나 transistor 를 별도로 만들어 packaging 하여 적게 조립하는 方式이다. 예를 들면 0.310"의 正方形磁器基板 위에 하나 또는 數個의 部品을 收納하여 이것을 여러겹으로 overlap 시켜 一回路를 구성하여, 側面으로 lead 線의 납땀을 한 後, epoxy resin 으로써 mold 한다. 만들어진 製品의 形狀은 約 1cm³의 形狀이다. 이러한 標準回路 module 을 必要個數를 사용하여, 임의로 機器를 構成할 수 있다.

(ii) Moletronics

Westinghouse 社의 商品名으로, glase 나 ceramics 等の 絶緣物의 wafer 上에 抵抗이나 condenser 等の 組立回路를 薄膜蒸着法으로 만들어, 부족한 곳에는 그 위에 더 wafer 數를 겹쳐서 하나의 動作回路를 만들어내는 方式이다. 따라서 이경우는 回路部品 또는 等價回路라는 것은 本質的으로 생각할 수 없어 作用 block 라는 思想이 지배적이어서, 종래의 方式中에서 가장 유력한 것이다.

(iii) Integrated Circuit

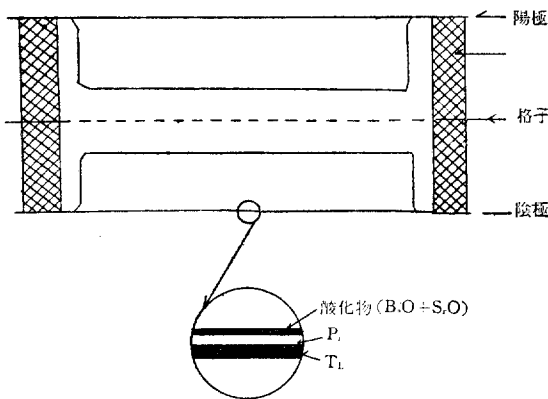
Fairchild Semiconductor 社 등에서 시작된 方式으로, 半導體 Wafer 를 基體로, 그 위에 絶緣膜을 生成시키거나 또는 不純物을 擴散導入시켜서, transistor 와 같은 Active element 나 抵抗, Condenser 等の passive element 도 다 같이 一體로 만들어서, 이것이 하나의 動作回路素子(Functional element)가 될 수 있도록 한 방식이다. 크기 1/16인치(=1.6mm) 平方程度의 半導體, 가령 Si 의 wafer 를 실고 있는 Header 의 크기는 7mm 直徑程度이다.

(iv) TIMM(Thermionic Integrated Micro module)

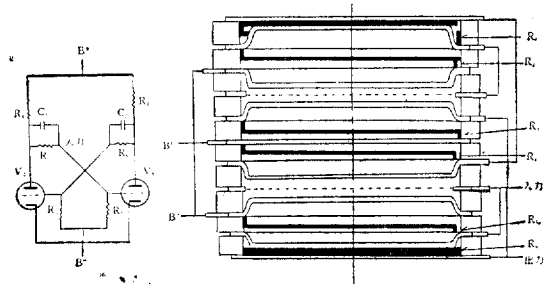
GE 社가 開發한 것으로서, 一種의 超小型 Ceramic 眞空管이고 Heater 가 없는 것이 특징이다. 構造는 거의 眞空管과 같으나, 數個의 部品과 眞空管을 一體로 구성하고 있다. 回路部品은 ring 狀 또는 disc 狀으로 만들어, 全體가 圓筒形을 하고 있고, 各部品으로부터 발생하는 熱에 依하여 heater 가 없어도 충분히 眞空管部는 動作하여, 特히 耐放射線性에 우수하기 때문에 半導體回路와는 달리 다른面에서의 利用이 囑望된다.

[表 1]

方式分類	方式名 또는 商名	社 名	狀 況
高密度 格納 方式	1. AMP MECA	AMP Inc.	商品化
	2. Macro Module	Burroughs Corp.	試 作
	3. Cordwood (Weld Pak) Techuique (Dice)	Roythen Mfg. Co. Republic Aircraft corp	商品化 一部 商品化
	(Mini Weld)	Francis Associates with Sippican Co- rp.	"
	(商品名 없음) (商品名 없음)	Bendix Corp. Litton Ind.	" "
Module 方式	4. Micro Module	RCA	開發中
	5. TIMM	GE	"
	6. DOT Circuitry	Hughes Aircraft	"
	7. UCA	Mallory Co	一部市販
	8. Microminature Module	Sylvania Products Corp	開發中
	9. Ceramic-based Microcircuit	Sprague Elec. Co.	"
	10. MICRAM	Cleveland Metal Specialties Inc	軍 用
	11. Microcircuit	Aerovox Corp	開發中
	12. Mu-Circuitry	I.R.C.	商品化
	13. Thin Film Technique	Varo Mfg. Co. Motorola. Servomechanism; IBM	開發中
固體回 路方式	14. Solid Circuit	Texas Instruments	商品化
	15. Semi Nets	Fairchild Semico- nductor Corp.	開發中 一部商 品化
	16. Molecular Electronics	Westinghouse	開發中



[그림 2] TIMM 의 1 element



[그림 3] TIMM 回路

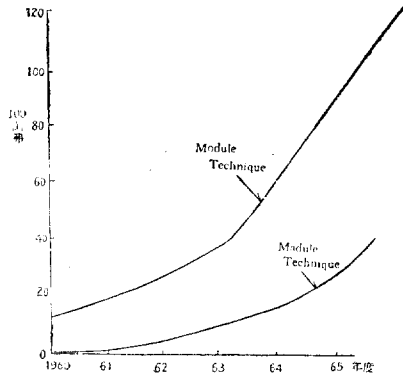
4. 超小型化에 對한 豫測

超小型化가 어떻게 앞으로 進展되어갈 것인가에 對해서는, 現今으로서는 概括的이 豫測밖에 세우지 못하나, 美國에서의 專門家들의 ancate 結果에 의하면 다음과 같다.

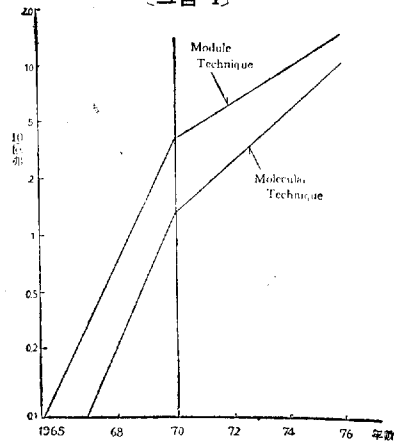
- i) 1980년에는 Meclucal Electronics 의 市場은 140億 弗로 擴大되고, 全超小型市場의 85%를 차지할 것이다.
- ii) 1970년에는 軍用으로서 超小型市場의 55%를 차지하고, 남어지는 商用으로 될 것이다. 또 全電子機器의 20%는 超小型化 될 것이다.
- iii) 固有의 信賴度에 對한 最大 Potential 은 Molecular Electronics 와 같은 半導體材料에 依한 固體回路에 對한 技術이 가지고 있다고 본다.
- iv) 回路設計에 對한 最大自由度는 高密度 格納方式에 이 달려 있다.
- v) 信賴性對 Cest 關係에서 볼 때, 現在 使用되는 것中 最大可能性을 지닌것은 Cordwood technique 이다.
- vi) 現在 주어질 가능성은

1965—1970 Thin film
1970— Molecular Electronics

以上 이들의 市場性에 對해서는 [그림 4] [그림 5]에 서 보는 바와 같이, 1970年度에 30倍程度는 生産되고 있으며, Moduler 方式은 Molecular electronics 에 도달하기까지의 中間方式으로 내다 보이며, 일시적으로 兩者가 共存하는 Hybrid approach 가 존재하여, 1970年以後는 薄膜技術과 半導體回路技術만으로 된다고 내다 보고 있다.



[그림 4]



[그림 5]

[II] 電子材料과 物性論 (物性工學)

1. 緒 言

電子材料과 物性論, 或은 物性工學을 論하기 前에, 보통 物性論(或은 物性工學)이라고 불리는 學問은 어떠한 것인 가를 간단히 說明하기로 한다. 단 한말로 말하면, 物質을 構成하고 있는 粒子의 運動法則에서 그 物質의 性質을 파악해내 보자는 것이 物性論의 目的이며, 이것을 응용하는 것이 物性工學이다. 우리들이, 보며, 만지고 있는 物質은 모두 多數의 粒子(電子, 原子, 分子等)로써 構成되고 있으나, 같은 炭素의 原子가 集合되어도, 그 集合方法에 따라 石墨으로 되거나, graphite로 되거나, 或은 diamond로 되거나 한다. 또 어떤 原子는 모여서 金屬을 만들며, 어떤 原子는 모여서 絶緣物을 만든다. 이와 같이 한말로 原子의 集合體라고 하여도, 그 集合時의 配列方式이나, 그 속에서 粒子가 어떻게 運動하고 있는가에 따라 그 集合體의 電氣的, 磁氣的, 力學的, 或은 光學的인 性質이 달라진다. 假令 電子가 物質속에서 어떻게 運動하고 있는가를 생각하면, 電子는 撞球, 野球, 野球의 運動을 支配하고 있는 法則에는 따르지 않고, 다

른 法則, 量子力學이라고 불리는 法則에 따른다는 것이 今世紀에 와서 명백해졌다. 이것들이 많이 集積해서 物質을 만들 때, 우리들이 관측하는 것은 물론 하나하나의 粒子運動이 아니고, 그네들의 集團으로서의 행동, 많은 粒子의 運動의 平均값을 觀測하고 있는 것이다. 이 集團의 運動法則을 가르치는 것이 統計力學이다. 따라서 物性論은 一見 千差萬別한 物質을 量子力學과 統計力學을 支柱로 하여, 이 原理에 의거하여 통일적으로 이해코저 하는것이다. 이와 같이 하여 物質의 性質에 관한 基本的知識이 얻어지면, 그것을 근원으로 하여 어떤 性質을 가진 物質을 만들어 낼 수 있는 것인가, 또 어떻게 하면 그것이 가능한가 등에 對해서 자연히 알 수 있게 된다. 어떤 物質은 어떤 溫度에서 얼마만큼의 電氣抵抗을 가지는가에 관한 data를 集積할 뿐만 아니라, 오히려 그 物質은 그 溫度에서 왜 그러한 값의 電氣抵抗을 가지는가의 지식을 습득하는 것이 대단히 有用하다(現象論에서, 物性論으로). 이것은 近來의 電子材料의 진보가 입증하고 있다.

이와 같이 物性論은 物質의 性質을 根元的으로 이해하고저 하는 것이니, 이것이 工業技術에서의 材料問題와 밀접하게 관계하고 있는 것은 既知의 事實이다. 物性論의 근래의 進歩은 技術의 要求, 或은 技術의 進歩에 기인한 것이 크며, 또 이와 같이 하여 진보한 物性論은 技術에 功헌했다. 따라서 物性論에서는 基礎와 應用이라는 差別은 거의 없어졌다고 해도 과언이 아닐것이며, 電子材料과 物性論이라고, 題目을 붙쳐 강의하는 의의도 여기에 있다고 본다. 이와 같은 物性論의 方法을 採用해서 성과를 내어 오늘날의 半導體工學, 物性工學의 基礎를 開拓한 Schockley 博士의 말을 여기서 引用해 보기로 한다. 이는 上述한 物性論의 研究方法論을 端的으로 表現하고 있다.

Bell 研究所에서는 당면하는 研究對象을 基礎적으로 理解하는 것을 主眼으로 했다. 固體의 現象을 基礎적으로 理解하는 것은 다음 네가지의 question에 응답하는 것이다.

- 即 (i) 그 物質은 어떤 原子가 어떻게 配列되어 있는가.
- (ii) 그와 같은 原子配列은 왜 일어나는가?
- (iii) 그 原子配列下에서는 電子나 이온은 어떻게 舉動하는 것이 物性論으로 期待되는가.
- (iv) 前問에서 알기된 電子, 이온等의 各自의 舉動은 어떻게 構成되어서, 問題로 삼고 있는 복잡한 Macro 現象이 생기는가(引用 끝).

筆者는 本講에서 앞으로 物性論에 對해서 基礎가 되는 가장 基本的인 개념을 말하고, 여기서 나온 成果에 對해서 몇가지 最近의 實例를 들어서 이야기하고자 한다.

2. 導線을 接하기만 해도 왜 電流가 흐르는가?

우리들이 흔히 남뎀을 하기 귀찮아서, 銅線을 꼬와 놓을 때, 그렇게 해도 電流가 흐르는데, 여러분은 이問題에 對해서 어떻게 解答할 것인가. 「그것은 金屬中の 自由電子의 tunneling effect에 依한것」이라고 解答하는 사람은 本講을 읽을 必要는 없다. 導線으로서 假令 銅線이라고 한다면, 銅線은 銅의 原子의 集團인것은 명백하다. 原子는 原子核과 그 周圍에 運動하고 있는 電子로 構成되며, 銅線속에 흐르는 電流는 電子의 運動이다. 그러면 原子核의 周圍를 運動하고 있을 電子가 어떻게 해서 電流를 나타내는 것일까? 이 問題는 다음에 미루고, 우선 原問에 돌아가 銅線거리 接하면, 肉眼으로 볼 때 接觸하고 있어도, 그와 같은 原子構造까지 생각하면, 완전한 하나의 銅線과 달라 한쪽의 銅線表面의 銅原子와 또 하나의 銅線表面의 原子사이에는 조그만 間격이 있을 것이며, 이 間격을 어떻게 해서 電子가 통과하게 되는 것일까? 이것에 應答코져 하는 것이 只今の 問題이다. 이 물음에 대답하기 爲해서, 바로 銅線을 생각하지 않고 우선 하나의 原子에 對해서 考察해 보기로 하자.

原子를 構成하고 있는 素粒子中에서, 以下の 物性論에서 主役인 역할은 電子가 하기 때문에, 먼저 電子의 運動에 對해서 살펴보기로 한다.

(i) 電子에도 波動性이 있다.

前述한 바와 같이 電子運動은 撞球의 球의 運動을 支配하는 力學(Newton 力學)에는 따르지 않는다. 그것은 電子를 撞球의 球라고 想像한 粒子로서 생각하면, 自然現象을 잘 설명하지 못하기 때문이다. de Broglie는 이에 對해 電子는 撞球의 球와 같은 粒子가 아니고, 그 運動에는 波動性이 있다고 했다. 電子뿐만 아니라, 運動量 p 를 가지고 運動하고 있는 粒子는 그 運動에 波動性을 동반하여, 그 波長 λ 는 $\lambda = h/p$ 라고 한다. (h 는 Planck의 常數). 波動이라고 믿어진 光에 粒子性이 인정되고, 그 逆으로 粒子라고 생각하던 電子等에 波動性이 인정되어, 量子力學의 發端이 되었다. 우리들이 日常生活에 보는 物質은 質量이 크기 때문에, 運動量이 h 에 比해서 대단히 크고, 따라서 위의 de Broglie의 關係式에서 波長을 구하면, 波動性等을 고려할 必要가 없다. 그러나 電子처럼 적게 되면(質量 $9.1 \times 10^{-28}g$), 運動量이 h 에 比해서 無視못하게 되어서, 波動性이 현저하게 된다. 이 電子의 波動性은 電子線을 結晶格子에 쪼이면, 電子線이 回折하는 것이 實驗적으로 확인됐고, 波動에 特有的 현상인 回折現象에 依해 波動性이 인정되었다. 이 電子線回折은 薄膜의 結晶構造의 解析에 利用되고 있다. 이 物質의 粒子性과 波動性을 矛盾없이

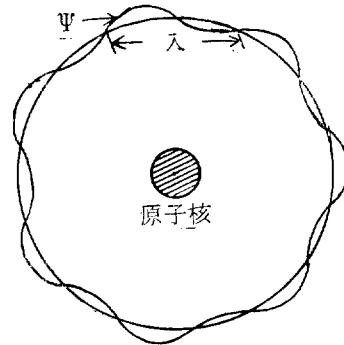
統一한 것이 量子力學이다. 量子力學은 一名 波動力學이라고도 하는 것으로 보아, 粒子運動을 그 波動性에 着眼해서 波動方程式의 形으로 표현하여 波動函數 Ψ 로 서 記述한다. 普通 粒子라면 그 運動은 座標와 運動量으로써 記述되나, 電子와 같은 素粒子는 그 현저한 波動性때문에 位置와 運動量으로써 運動을 論할 수는 없게 된다. 이러한 量子論의 世界像의 特徵을 概略적으로 살펴보기로 하자.

振動數 ν 의 波動을 생각해보자. 이 波動이 空間의 어느 곳에 存在하는 가는 말 할 수는 없다. 振動數가 ν 인 傍에 있고, 조금씩 다른 多數의 振動을 合成하면, ν 인 곳에 最大의 振幅을 가진 波의모임(波束)이 생긴다. 電子라는 것은 이러한 것이 라고 생각해도 좋을 것이다. 그렇게 하면 電子가 지금 空間의 어떤 位置에 있으며, 얼마만큼의 速度로 運動하고 있는 가를 明確히 할 수는 어렵다는 것을 알 수 있을 것이다. 事實 우리들이 觀測하는 電子의 位置와 運動量에는 必然적으로 어느程度의 曖昧함이 原則적으로 存在하여, 位置의 曖昧함 Δx 와 運動량의 曖昧함 Δp 사이에는

$$\Delta x \Delta p \approx h$$

라는 關係가 있다. 이것을 Heisenberg의 不確定性原理라고 하고, 이것이 量子의 世界의 第一의 特徵이다. 따라서 우리들이 電子運動을 論할 때, 어느 點에 電子가 있다고는 말 할 수 없지만, 그 點에 電子가 있는 確率은 얼마라는 것은 말 할 수가 있고, 이러한 存在確率을 주는 것이 波動函數 Ψ 의 絶對값의 2乘이다.

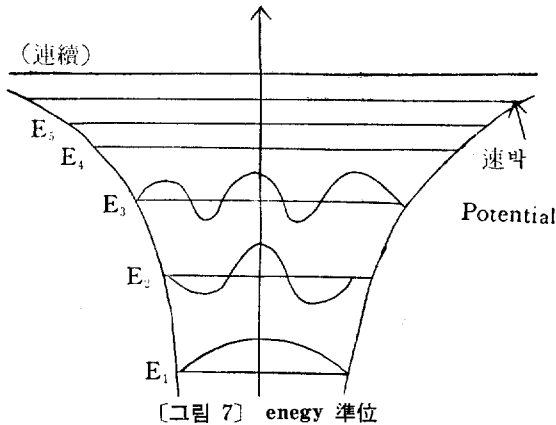
(ii). 束縛電子의 energy는 떠엄떠엄으로 된 energy 準位의 값만을 取한다.



[그림 6] 電子의 軌道

實例로서 水素原子의 原子核周圍를 運動하고 있는 하나의 電子를 생각하자. 簡單히 [그림 6]과 같은 軌道를 생각하자. 電子에는 波動性이 있기 때문에, 어떠한 軌道라도 可能한 것이 아니고, 電子가 一周해 오면, 物質波는 原位相에 돌아와 있어야 하기 때문에, 可能한 軌道の 長이는 波長의 整數倍이라야 한다. 이와 같은 軌道만이 安定하고(定常狀態), 電子가 이 狀態에 있는 以上 하나의 energy를 가지고 있다. 이 條件을 充足치 않은 軌道는 存在하지 않으며, 따라서 이에 對應하는 energy도 없고, 結局 電子의 energy는 連續的으로 任意값을 取할 수 없어, 떠엄떠엄한 energy 準位의 값을 取한다.

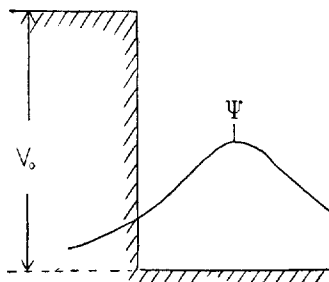
이 層層의 값을 energy 準位라고 하고, 이것 亦是 量子的 世界的 特徵이다. 電子가 原子核에서 아주 멀리 떨어져 나가면, 核의 影響이 없어지고, 上記條件은 必要치 않아, energy는 連續인 값을 取할 수가 있다. 이를 圖示하면, 【그림 7】과 같게 된다. 지금은 例를 水素原



자에 對해서 말했으나, 위의 結論은 모든 原子에 該當된다. 이로서 電子가 取할 수 있는 energy 값은 層層의 값만을 取할 수 있는 것을 알았으나, 그와 같은 軌道에 電子가 들어 갈적에는, 무슨 制限이 있을 것인가. energy는 낮은 쪽이 安定하다고 해서, 最低 energy의 軌道에 無制限으로 얼마든지 많은 電子를 收容할 수 있는 것일까? 그 答은 No이다. 軌道에는 定員이 있다. 電子에는 이를 古典의으로 생각할 때 自轉에 相當하는 自由度가 있고, 自轉에 相當하는 運動을 하면, 磁氣 moment가 생기게 되고 이를 spin이라고 하며, 左轉, 右轉에 따라 各磁氣 moment의 方向이 逆이되기 때문에, 두 種類의 spin이 存在한다. 따라서 電子가 軌道에 들어 갈 때, 하나의 軌道에는 spin이, 다른 2個의 電子만이 들어갈 수 있다. 이를 Pauli의 排他律이라고 하고, 量子論의 重要한 原理의 하나이다.

(iii) 箱子속의 電子는 滲透해 나온다.

電子가 어떤 potential로서 束縛되고 있는 경우를 생각해보자. 假令 【그림 8】처럼 깊이 V_0 의 potential의 우물속에 密閉되고 있는 경우이다. Newton力學的으로 생각하면, 이 우물밖에서의 電子運動 energy는 全 energy에서 V_0 를 뺀 것이다. 그런데 지금 電子는 이 우물속에 갇혀 있기 때문에, 全 energy는 V_0 보다 작다. 따라서 우물밖에서의 運動 en-



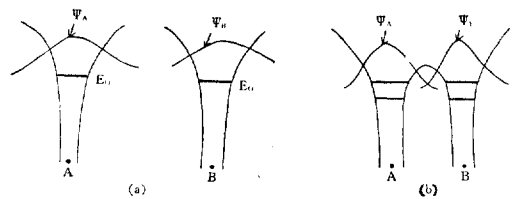
의 全 energy는 V_0 보다 작다. 따라서 우물밖에서의 運動 en-

ergy는 負로되고, 그러한 運動은 存在하지 않는 것을 意味한다. 結局 우물속에서 運動하고 있는 電子는 벽에 부딪혀 뒤돌아와 밖으로 나가지 못한다. 그러나 量子力學的으로 이 問題를 풀이한 結果는 【그림 8】에 ψ 로서 表示한 것처럼, 벽밖이라도 ψ 가 有限값을 取하며, $|\psi|^2$ 이 有限이기 때문에, 電子는 벽밖에도 存在하는 確率을 가지며, 結局 우물속에 束縛되어 있던 電子가 어느듯 밖으로 滲透해 나올 수가 있다는 것이다. 一見 奇異한 이러한 現象을 「tunneling effect」라고 부르며, 이것은 potential의 場所의 變化가 物質波의 波長보다 짧은 範圍에서 일어나는 경우에는, Newton力學的인 近似는 許容되지 않고, 物質의 波動性이 強調되는 量子論의 獨特한 例이다. 【그림 8】과 같은 potential의 우물에 가까이 가면, 電子는 어느듯 하나의 우물에서 tunneling 效果로 다른 우물에 옮겨 간다. 따라서 銅線 같은 金屬에 있는 電子는 보통 金屬內에 있고 表面에 나타나지 않으나, (金屬表面은 電子에 對해서 potential 壁을 만들어, 그 속에 電子를 갇쳐 놓고 있다), 다른 金屬의 表面과 接觸하면, 이 potential 壁끼리 너무나 接近하기 때문에, 上述한 tunneling 效果에 依하여 하나의 金屬에서 다른 金屬에 電子가 옮겨가는 것이다(例 Easaki diode).

3. 왜 어떤 것은 導體로 어떤 것은 絶緣體로 되느냐

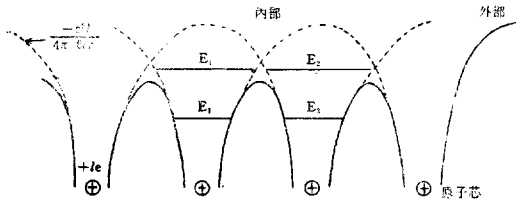
前節에서는 하나의 原子에 附屬하는 電子의 舉動에 對해서 살펴보았으나, 電子材料와 같이 原子가 많이 모여서 結晶을 이루고 있을 때를 살펴보기로 하자. 보통 結晶이라는 것은 原子가 多數 規則整然하게 集合하고 있는것이나, 이때에 個個의 原子性質, 그中 特別히 電子의 性質이 어떻게 變貌해가는데 對해서 考察해 보자.

原子에는 多數의 電子가 附着하고 있어, 原子番號 z의 原子라면 z個의 電子가 있으나, 物性論에 있어서도 보통의 演劇과 같이, 이들의 電子는 主役과 外 多數로 나누어진다. 이節에서의 主役은 原子核에서 멀리 떨어진 쪽에 있고, 比較的 自由화된 電子(價電子)이며, 其他 多數의 電子는 核에 fasten 돼서, 原子芯을 이루고 있다. 이와 같이 생각하면, l價의 原子에서는 하나의 主役電子에 對한 原子芯의 束縛 potential은 $-e^2l/4\pi\epsilon_0r$ 라는 Coulomb potential이다. 이 Coulomb potential은 原子가 規則整然하게 集合해 오면 서로 overlap 되어서,



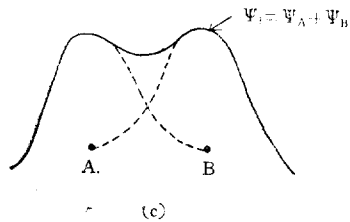
[그림 9] 原子芯에 依한 周期 Potential

【그림 9】과 같이 周期 potential 이 形成된다. 그러면 【그림 9】의 E_2 와 같은 energy 를 가진 電子는 原子芯의 束縛에서 벗어나 다른 原子쪽에 움직이게 된다. E_1 의 電子도 tunneling 効果로서 다른 原子쪽에 移動하게 된다. 이와같이 하여, 電子의 波動函數가 서로 겹쳐지는 것이나, 이때에는 電子의 energy 準位는 孤立原子의 경우와는 달라진다. 이 狀態를 原子2個에 對해서 생각해 보자. 이와 같이 되면, 두 原子를 一體로 생각하지 않으면, 안된다(電子는 어느 原子芯에도 갈 수 있기때문).

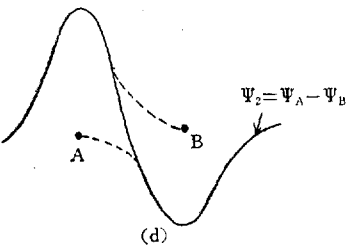


【그림 9】 電子交換

【그림 10】과 같이 孤立原子 A, B 가 서로 接近하여 電子波動函數가 겹쳐지면, 두개를 一體로 생각한 새로운 波動函數 Ψ 는, 元波動函數가 겹쳐져서 만들어지는 것이나 【그림 10】(c)(d) 에 나타내는 것과 같이, 이것에는

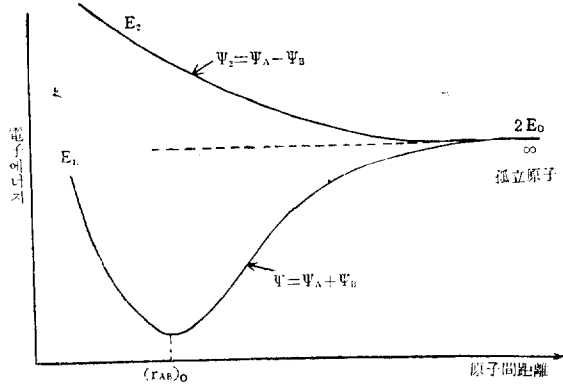


$\Psi_1 = \Psi_A + \Psi_B$
 $\Psi_2 = \Psi_A - \Psi_B$
 의 두가지가 있다. Ψ_1 은 A 와 B 와의 中間에 電子가 많이 모여 드는 確率이 크고, Coulomb 力이 作用하여 energy 가 내린다.

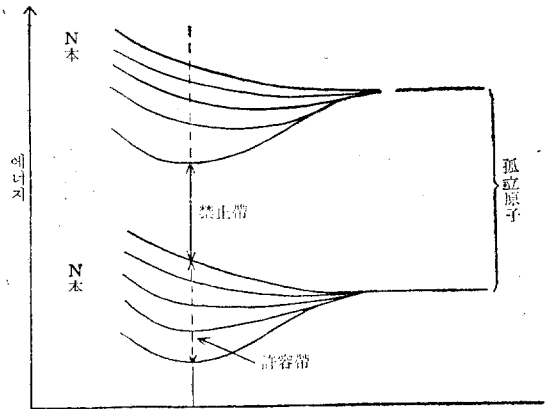


【그림 10】 電子交換

Ψ_2 에서는 A 와 B 와의 中間에서 $\psi_2=0$ 이기때문에, 거기에 電子가 있는 確率은 없어서, 그와같은 일은 생기지 않는다. 【그림 11】에서 보는 바와 같이, 멀리 떨어져서 서로 孤立되고 있을 때는, 다 같이 E_0 인 energy 準位가 核間距離가 좁아져서 電子交換이 始作하는 同時에, E_1, E_2 라는 두 energy 準位로 分裂한다. 또 너무 核間距離가 接近하면, 反瀧力 때문에 energy 가 올라 간다. 多數의 原子가 規則 整然하게 集合할 적에도 같다. 假令 N 個의 原子가 結晶을 만들 때, 孤立原子로 N 個가 하나로 뭉쳐 있던 energy 準位는 N 個의 準位로 分裂한다. 原子數 N 은 대

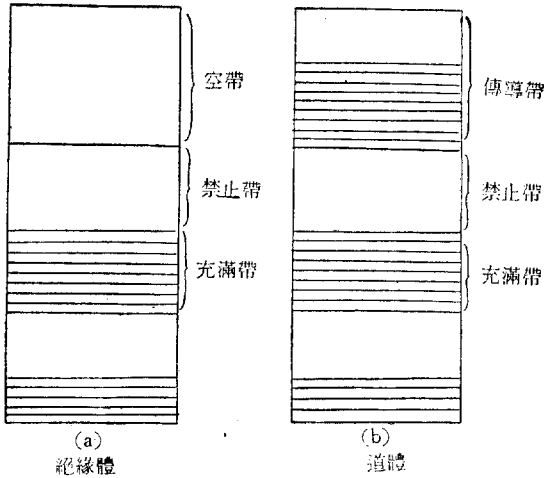


【그림 11】 原子間相互作用에 依한 energy 準位의 變化



【그림 12】 energy 帶形成過程

端히 크기 때문에 N 個의 線은 서로 接近하며, 거의 連續 energy 準位의 모임을 形成한다. 이것을 energy 帶라고 한다. 孤立原子에 屬했던 電子는 離散의 energy 를 갖고 있기 때문에, 그 하나하나의 準位에 對應하여, 結晶中에 하나의 帶가 생긴다. 따라서 帶와 帶사이에는 energy 準位가 存在하지 않는 energy 領域이 있다. 이것을 禁止帶라고 하고, 電子가 들어가는 곳을 許容帶라고 한다. 許容帶에는 Pauli 의 排他律에 따라 電子가 energy 의 낮은 狀態로부터 配屬되며, 차츰 充滿되어가는데, 이 狀態는 【그림 12】처럼 나타나며, 가득찬 帶를 充滿帶(價 電子帶), 電子가 全然없는 帶를 空帶라고 한다. 【그림 13】(a)처럼 空帶는 完全히 비어있고, 充滿帶가 完全히 가득차있는 것이 絕緣體이다. 電氣傳導는 電界를 加했을 때, 電子가 電界에서 energy 를 받아 높은 energy 狀態로 되어서 비로소 電流가 흐른다. 充滿帶內부의 電子는 energy 를 增加시킬려고 해도 위의 準位가 滿員으로 空席이 없어, Pauli 先生의 禁制에 依하여, 空席이 없는 것에는 들어갈 수가 없다. 第一 위의 電子는, 그위에는 電子가 없어도 禁止帶이기 때문에 亦是 자리가 없어 energy 를 增加시키지 못한다. 結局 電界에 依하여 加速 되지 못하고, 電流가 흐르지 않으니 絕緣體이다. 그러

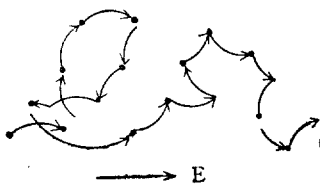


【그림 13】 絶緣體와 導體의 帶構造

나 (b)와 같이, 途中에까지 가득차게된 energy 帶의 電子는 電界에서 energy 를 얻어 위의 비어 있는 準位로 오르게되기 때문에 電流가 흐른다. 따라서 一部 가득차게된 帶를 傳導帶라고 한다. 勿論 絶緣體의 空席이라도 빛等の energy 를 주어서 禁止帶를 뛰어 넘어서, 充滿帶에서 電子를 올려주면, 그 電子는 電氣傳導를 이르기 때문에, 傳導帶라고 한다. 金屬內를 自由로 움직일 수 있는 電子가 있다는 것은 이 傳導帶의 電子이다.

4. 物質中에서 電子通行을 妨害하는 것은 무엇인가?

電氣傳導狀態는 各物質에 따라 다르나, 이는 모두 電子의 通行을 妨害하는 電氣抵抗이 있기 때문인데, 이러한 電氣抵抗을 생기게 하는 것은 무엇일까를 살펴보자. 일단적으로 物質內의 原子核은 그 平衡點附近에서 甚하게 振動하고 있으며, 이 振動은 熱에 因하여 더욱 커지고, 그 振動 energy 의 總和가 熱量으로 나타난다. 따라서 溫度는 이 內部에서의 運動 energy 의 尺度를 나타내는 것이며, energy 는 絶對溫度에 比例하는 것으로, 그 比例常數를 Boltzmann 常數라고 한다. 量子力學의 結果에 依하면, 完全히 靜止하고 規則的인 電子核의 格子는 電子直行을 全然 妨害하지 않으나, 現實에서는 原子核은 上述한 바와 같이, 甚하게 不規則的으로 振動하고



【그림 14】 電界中에서의 電子運動

있다. 이 不規則的인 振動(熱振動)이 電子의 通行을 妨害하는 것이다. 電子는 電界方向으로 運動하려고 하지만, 通路에서 原子核이 熱運動을 하고 있기에, 거기에 부딪쳐 結局은 zigzag mo-

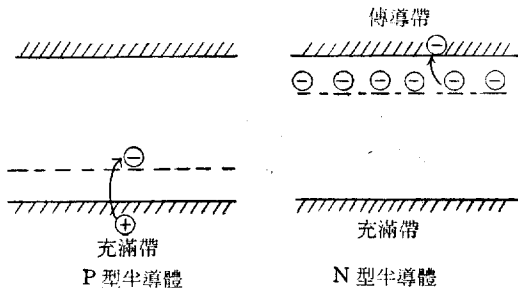
tion 으로 電界方向으로 移動해간다 【그림 14】. 이 原子核의 熱振動에 因한 電子散亂이 電氣抵抗의 主要原因이다.

5. 完全無缺한 結晶은 없다.

이 世上에 있는 實際의 結晶은 完全한 것이 없어, 上述한 熱振動等에 因하여 不完全성을 지닌다. 假令 原子의 熱振動 때문에 原子가 있어야 할 格子點에서 떨어져, 原子가 없는 格子點(空格子點)이 생기거나, 格子間에 無理로 들어가 配列을 紊亂케 하기도 한다. 前者를 frenkel 型缺陷, 後者를 schottky 型缺陷이라고 하고, 한 마디로 點缺陷이라고 한다. 點缺陷으로서는 다른 原子가 不純物로서 들어가 있는 것도 있어, 이것은 格子位置에 들어 앉아버리는 것과 格子사이에 들어가 있는 것도 있다. 이 以外로 缺陷이 點이 아니고, 一次元的으로 이어진 所謂 dislocation 도 있다. 이와 같은 缺陷이 있으면, 勿論 그것은 結晶格子의 完全한 週期성을 깨뜨리는 것이기 때문에, 電子는 여기서 散亂되고, 電子抵抗의 原因으로 된다.

6. Diamond 와 Germanium

Diamond 와 Germanium 는 같은 原子配列을 하면서, 하나는 絶緣體로 또 하나는 半導體로 되는 理由를 살펴보자. Diamond 는 勿論 炭素의 結晶이며, Germanium 는 炭素와 類似한 電子構造를 가지고 있으나, 第一外側의 電子는 炭素에 比하여 核의 束縛이 훨씬 弱하다. 여기서 孤立原子의 energy 準位를 생각해 보면, 外側의 電子일수록 準位間의 間隔은 좁았다. 따라서 거기서 된 energy 帶間의 間隔, 即 禁止帶幅도 必然的으로 Ge 쪽이 炭素보다 좁아진다. 여기서 溫度가 높아지면, 熱運動 때문에 그때까지 充滿帶에 있던 電子가 傳導帶로 올라 갈 機會가 생긴다. 勿論 禁止帶의 幅이 熱運動 energy 에 比해 훨씬 크면, 아무리 熱을 올려도 올라 갈 수가 없다(diamond). 좁으면 올라갈 수가 있다(Ge). 이것이 眞性半導體이다. 半導體에 對해서는 널리 알려져 있기 때문에, 詳細하게 記述은 아니 하지만, 要點은 大略 다음과 같다. 假令, Ge 中에 5價의 不純物(砒素)를 조금 넣으면, Ge 代身에 As 가 正規의 格子點을 차지한다. As 는 4個의 電子를 가지고 周圍의 Ge 와 結合하지만, 하나의 電子가 餘分으로 남는다. 이 電子는 大體로 As 近傍을 運動하고 있으나, Ge 라는 誘電率이 큰 媒質속에 있기 때문에, coulomb 引力이 弱하고, 束縛도 弱하다. 따라서 energy 만 조금 주어지면, 이 電子는 束縛에서 떨어져 自由로 結晶內를 움직일 수 있다. energy 帶로서 그리면 【그림 15】와 같이 傳導帶의 바로 밑에 不純物準位가 있어, 여기서 뛰어나온 電子가 傳導帶에 올라, 電氣傳導가 생긴다. 이와같은 半導體를 N



[그림 15] 半導體의 energy 準位

型半導體라고 하며, 電子를 供給하는 不純物을 donor 라고 한다. 다음에 Ge 에 3價의 不純物을 넣으면, 이 不純物原子는 價電子가 3個 밖에 없기때문에, 電子가 不足한 곳(正孔)이 하나 생긴다. 여기에 周圍의 Ge 에서 電子가 들어 오면, 負로 帶電한 不純物原子를 남겨, 正孔이 移動한 것으로 된다. 이와 같이 하여 正孔이 結晶 속을 移動하며, 이것에 의하여 電氣傳導가 行해진다. 이것이 P型半導體이며, 이 正孔을 供給하는 不純物을 acceptor 라고 한다.

7. 協力하면 強해진다.

人間社會뿐만 아니라, 自然界에도 여러가지 協力現象이 存在한다. 假令 磁氣雙極子를 磁界속에 넣으면, 雙極子는 磁界와 平行으로 向하고 있으면 低置 energy 가 가장 낮아진다. 物質中에는 電子의 spin 에 의한 磁氣雙極子가 많이 있지만, 前述한 熱運動 때문에 物質을 磁界속에 넣어서 電子의 spin 이 全部磁界方向으로 配列되어서 큰 磁氣分極이 생기는 것을 妨害하고 있다. 電子 spin 은 磁界方向에 平行이 아니면, 不平行으로, 두가지 밖에 取하지 못하나, 磁界는 이것을 平行으로 fasten 할려고 하고, 熱運動은 이와 反對로 亂雜하게 할려고 하여, 두 勢力이 balance 된 것으로 現象이 일어난다. 磁界와 全部 平行으로 되면, 位置 energy 는 가장 낮아지나, 이에 同伴하여 이系の entropy가 적어지게 됨으로, entropy를 增加시킬려고 하는 勢力과의 均衡으로 落着된다. 이것이 보통의 常磁性이다. 그러나 鐵과 같은 경우에는 隣接하는 spin 끼리가 서로 주는 影響이 強하여, 常磁性時와 같이 하나하나의 spin 과 波界와의 作用만을 생각할 수 없게 되고, 하나의 spin 은 自己의 行動을 周圍의 spin 에 의하여 強하게 規制된다. 周圍의 spin 磁氣모멘트에 의하여 생긴 磁界가 重疊되어, 結晶內에는 外部에서 磁界를 걸지 않더라도, 自發적으로 強한 磁界가 存在하고 있어, 그 磁界에 의하여 spin 은 서로 平行으로 配列하여, 큰 磁氣分極을 일으킨다. 이것이 強磁性體이다. 強磁性體라고 해도 高溫이 되면 熱運動이 基해져, 內部磁界에 의한 spin 의 束縛을 풀을려고

한다. 이 balance 가 무너지는 點을 curie 點이라고 하고, 이 以上の 溫度에서는 常磁性으로 된다. 強誘電體의 경우의 本質은 다르나 現象은 恰似하며, 電氣雙極子가 서로 協力함으로써, 外部電界가 없어도 內部에 電界를 만들어내어, 自發적으로 分極하는 것이다. 其他 여러가지 있겠지만, 自然界에서의 協力現象의 例로서 強磁性, 強誘電性を 들었다.

8. 例題

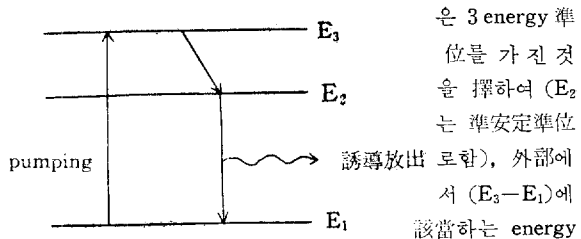
量子力學의 重要結果인 不連續인 energy 準位는 電子材料의 여러 面에서 利用되고 있다. 半導體의 不純物 準位는 그 顯著한 例이다. 여기서는 量子準位間의 誘導放出에 의한 Maser 에 對해서 簡單히 살펴봄과, 量子力學의 또하나의 成果인 固體의 帶理論의 利用의 한例로서, 帶와 帶사이의 tunneling 效果를 利用한 Esaki diode (tunneling diode)에 對해서도 簡單히 살펴보기로 한다.

(i) Maser

原子나, 分子의 量子準位間에 誘導放出을 일으켜서 Micro 波의 增幅를 하거나 發振을 하는 것을 Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation 의 Capital letter 만을 딴 것)라고 한다. 이것은 增幅器로서는 內部雜音이 적고, 發振器로서는 周波數安定度가 높은 것이 特徵이다.

Micro 波보다 더 周波數가 높은 赤外線이나 빛에도 같은 原理가 應用되어, Microwave 代身에 Light 로 바꾼 Laser 가 最近에 開發되어, 今後 急速한 發展이 期待된다. 이 原理는 大體로 다음과 같다. 原子, 或은 分子의 energy 準位는 不連續으로 있어, 電子는 이 準位에 energy 의 낮은 상태로부터 充滿되어가나, 系가 熱平衡으로 있을 적에는, 아래 準位로부터 위의 準位로 올라가는 것도 있고, 위에서 떨어지는 것도 있어서, 그것이 溫度에 의하여 定해지는 一定率로 平衡을 이루어, 結果로서 위의 準位보다 아랫準位에 많은 電子가 存在하게 된다.

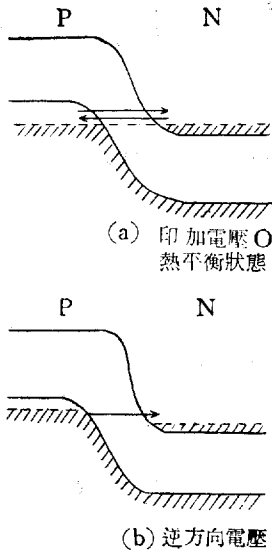
萬一에 무슨 方法으로 아래보다 위에 많은 電子를 存在케 하고, 그것에 外部로부터 energy 準位間隔에 相當하는 energy 를 가진 Micro 波나 빛을 보내어 떨어지게 함으로써, 增幅를 行할 수가 있다. 보통 電子의 分布狀態를 逆轉시키기 爲해서 하나의 方法은 [그림 16]과 같



[그림 16] 3 準位 Maser

주면, 電子는 E_1 에서 E_3 에 ru-mping으로 올리게 된다. 勿論 E_1 에 即時 뒤돌아 떨어지는 것도 있지만, 近處에 E_2 라는 準安定準位가 있으면, 電子는 그곳에 빛을 내지 않고 떨어져, 차츰 蓄積된다. 그리하여 密度的 逆轉이 일어나면, 外部에서 $(E_2 - E_1)$ 의 energy에 該當하는 電磁波를 入射할 때, 그것에 刺戟된 電子는 일제히 E_1 에 떨어져, $(E_2 - E_1)$ 의 energy를 가진 電波를 外部에 輻射하게 된다. 主로 centi波帶로 關發된 Maser를 빛의 周波數까지 가져간 것이 Laser이다. 이것에는 固體, 液體, 氣體 laser 등이 있으나, 固體 laser로서 主로 Ruby laser가 많이 使用되고 있다(勿論 化合物 半導體 laser 등도 있지만). 卽 Al_2O_3 속에 不純物로서 들어가 있는 Cr^{+++} 의 電子準位를 利用하는 것이다. 이것은 光源으로서는 輝도가 높고 指向性이 大端히 좋기 때문에, 遠距離通信에 便宜하다. 通信의 情報量도 부를수도 있고, 出力은 大端히 작은 部分의 加熱에도 使用되며, 局部的으로 大端히 강한 電磁界도 만들수 있는것等 將來의 應用은 大端히 廣範圍하게 될것이며, 期待가 크다.

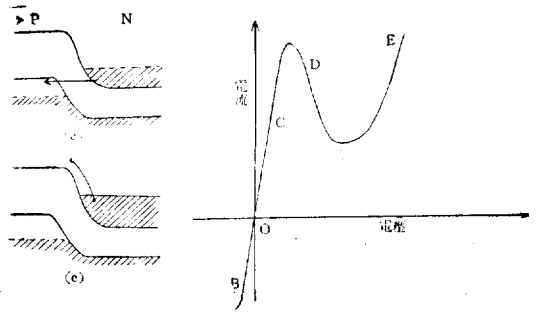
(ii) Esaki diode



[그림 17]

半導體에 不純物을 많이 添加하면, carrier는 縮退하여 金屬性的 傳導를 나타내게 된다. 이와같은 P型和 N型半導體로서 P-N接合을 만들면, 逆電流는 不純物의 添加量에 따라 增加해가거나, 不純物이 大端히 많아지면(Si, Ge로서 $10^{19}/cm^3$ 程度), 順電流보다 逆電流가 훨씬 커서, 順電流에 負性抵抗이 나타난다. 이 P-N接

合의 energy圖는 [그림 19] (a)에 나타낸 것처럼 不純物이 大端히 많기 때문에 Fermi面은 N型에서는 傳導帶內에, P型에서는 充滿帶內에 들어가 있어, 接合의 遷移領域의 두께는 얇다(P.N 不純物濃度 $10^{19}/cm^3$ 以上이면 100\AA 程度). 따라서 carrier의 波動函數는 禁止帶를 지나서 다른 쪽에 滲透하며, 이 tunneling 效果에 의하여 carrier가 흐른다. 그림 (b)와 같이 逆電壓을 크게 걸면, P型領域의 電子는 N型領域에 tunneling effect로 흘러 들어가, 큰 電流로 된다[그림 18 B部]. 그림 (c)와 같이 順方向에 電壓을 조금 걸어 주면, N型領域의 電子가 P型속의 空의 準位(正孔)에 흘러간다. 더욱



[그림 18] Esaki diode 特性

電壓을 增加시켜 그림 (d)처럼 N型領域의 傳導帶의 밑이 P型領域의 充滿帶頂上보다 높게 되면, 電子는 energy를 保存한 狀態로는 tunneling 效果로 N에서 P에 移動하지 못하며, 남은 energy를 振動狀態로서 格子에 주지 않으면 안된다. 이 確率은 放出하는 energy가 클수록 적어져서, 電壓의 增加에 따라 電流는 減少한다(負性抵抗). 電壓을 더 增加하여 그림 (E)처럼 되면, N型領域에서 P型領域에 原子의 注入이 始作되어, 비로소 P-N接合의 順電流가 나타난다. [그림 18]의 B,C,D,E는 各 [그림 17]의 (b),(c),(d),(E)에 對應하며, CD間의 혹은(凸部), 少數 carrier의 注入電流가 아니고 多數 carrier의 tunneling 電流이다. 이러한 特性을 利用하여 switch素子, 發振器, 記憶素子等에 使用할 수가 있다.