

電子裝置의 最近의 發展動向

姜 大 元
(Bell研究所 電子裝置研究室)

1. Bell System과 Computer

1948년에 Schockley, Barden 그리고 Brattain 에 의하여 Bell電話研究所에서 Transistor가發明된以後로부터 固體電子裝置는 急速한 發展을 보아 所謂 第二次 産業革命을 일으키고 있습니다. Magnetic Memory와 함께 固體電子裝置는 現代 電子計算機의 또한 重要的 基本要素가 되고 있으며 앞으로 電子計算機야 말로 우리生活에 커다란 影響을 미치게 될 것입니다.

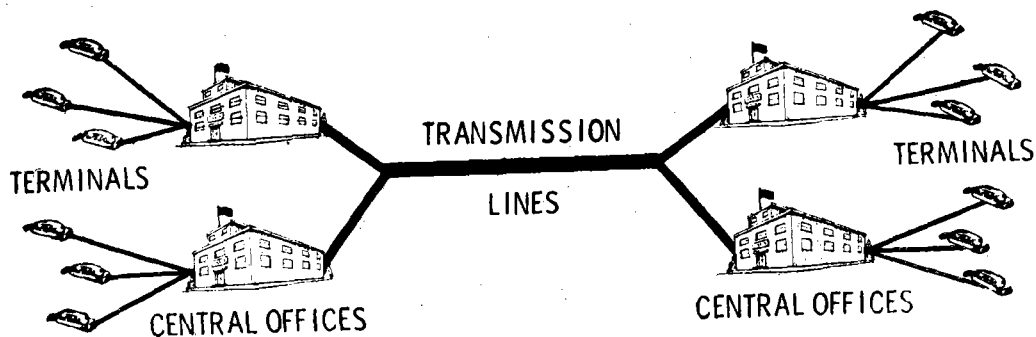
美國, 아니 世界最大의 電話 System인 Bell System이 이러한 第二次 産業革命에 큰 이바지를 하게 된것도 어떻게 보면 當然한 일이라고도 생각이 됩니다. Bell System은 앞날을 重視하는 政策이 確立되어 職員數 1萬6千名이란 世界最大의 純粹科學研究所를 갖고 있습니다. 事業體 이지만서도 基礎科學 研究開發을 重要視하는 Bell System이야말로 보기도문 存在라고 할 수 있습니다.

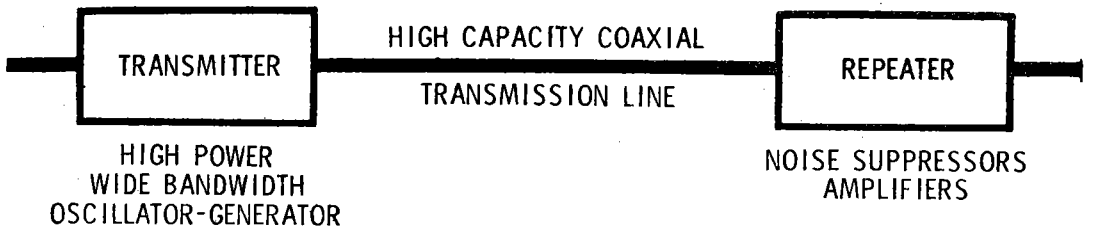
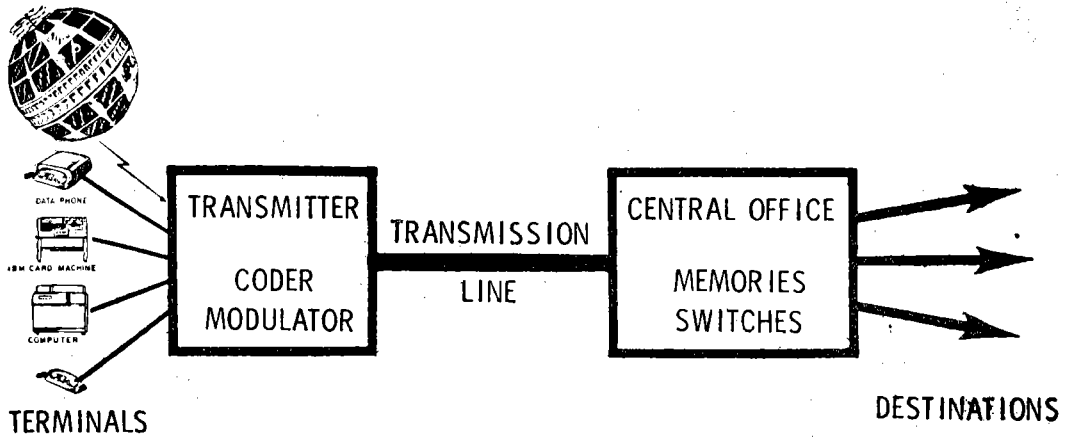
그러나 그 業績을 볼 때 將來를 爲한 長期 基礎研究가 있어야만 큰 成果를 이룰수 있다는 事實을 證明하여 주고 있습니다. 또한 Bell System

은 그 技術面의 複雜性이라든지 그 多樣性 그리고 Bell System의 顧客과 投資한 사람의 數等を 볼때 世界最大의 Computer라고 하여도 過言이 아닙니다.

이 Computer는 約 1億個 그리고 年增加量이 約 8百8拾萬個나 되는 Terminal 또는 電話가 있으며 2億5千萬 mile의 傳送線이 있습니다. 또한 이 Computer는 2億의 人口에게 奉仕하며 長距離通信에 依하여 수십개 國家에 何時를 莫論하고 奉仕하고 있습니다. 이 施設을 통해서 어느 때고 平均 500萬件的 電話通話가 이루어지고 있습니다. 이와같이 複雜한 中에도 不拘하고 數十年間 끊임 없이 일해왔고 巨大하게 增加하는 技術을 擔當함으로써 한 새로운 裝置들에 발을 맞추어왔다는 事實은 Bell System의 組織的인 면 그리고 經營的인 面의 優秀性을 證明합니다.

가) Bell System이 巨大한 電子計算機이니 電話網에 必要한 電子裝置들은 Computer에 必要한 것들이므로 電子裝置研究는 이에 따른 축당성을 띠우고 있습니다.





나) 普通 Computer는 세가지 重要한 部分으로 나눌 수 있습니다. 即 Input-output Terminals, 電子 Switches, Memories 등등 입니다.

다) 電話網을 보면 사람과 Coupling하는 電話 기타 器具를 Terminal이라 볼 수 있고 送信決定을 내는 Central Office를 Switch 및 Memory라 볼 수 있습니다.

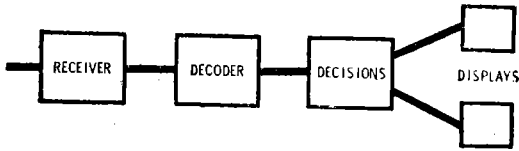
그 外에 送信線은 特殊한 性格을 갖고 있는데 그 理由는 주로 長距離送信의 必要性에서 오는 것입니다. 좀 더 Terminal을 자세히 보면 여러 가지 Terminal 器具가 있다는 것을 알게 됩니다. 제일 普遍的인 電話를 비롯하여 심지어는 通信人工衛星에 이르기까지 여러가지 器具가 使用되고 있습니다.

또한 送信器는 여러가지 Coding 中에서 가장 適合한 것을 求하여 中央電話局의 Memory와 相談을 하여 適合한 길로 送信이 되도록 Switch를 하여야 됩니다. 一旦 送信이 決定되면 長距離를 갈 수 있을만한 送信器가 必要하게 됩니다. 보통 이것은 強力한 高周波發振器로서 將來의 것

은 Laser 現在의 것은 Microwave Generator 입니다.

送信線은 Coaxial Cable이나 或은 Microwave 이거나 합나다라는 將來는 Microwave나 Optical Wave Guide가 使用되리라고 생각됩니다. 또한 Repeater가 要求되며 高周波 Low Noise Amplifier가 있어야 하겠읍니다.

그림에 있는 器具들은 보통 Computer에는 없으나 電話網에는 絶對로 必要한 것들입니다. 다음에 受信點을 보면 다시 Switch와 Memory가 큰 役割을 하게 되며 다시 Terminal을 통하여 사람에게 Information을 傳達하게 됩니다. 이러한 點들을 볼 때 電話網을 Computer라고 부를 수 있다는 理由를 알게 됩니다. 따라서 電話網에 必要한 電子裝置는 Computer에 必要한 것과 恰似한 것이며 그 以上으로 送信에 必要한 器具가 要求됩니다. 이러한 面으로 보아 電子裝置研究의 一例로 Computer의 가장 重要한 Switch를 드는것도 깊은 뜻이 있는 것으로 생각됩니다.



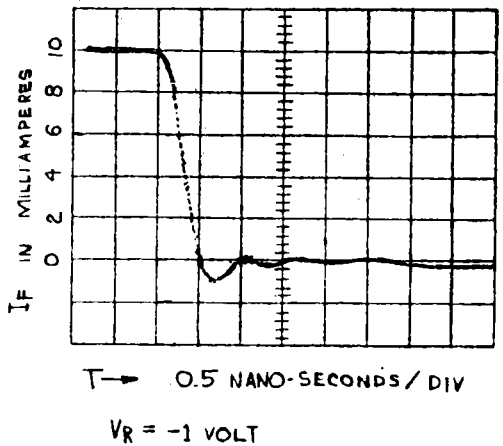
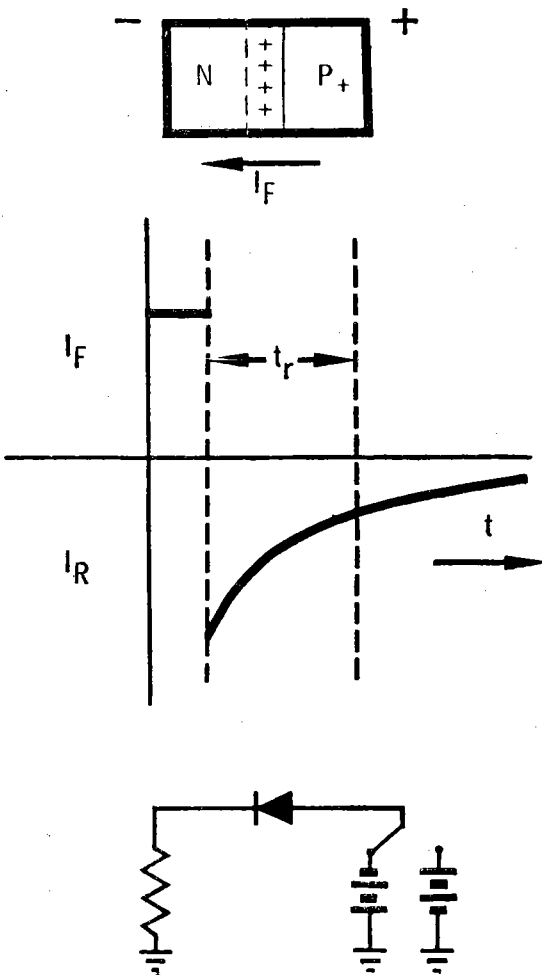
I. Switching Diode

1948年 Transistor의 發明 以後 固體電子裝置의 活躍이 야말로 所謂 第二次産業革命에 큰 要素라 할 수 있을 것입니다. 그중에 Computer의 基本 Switch는 p-n Junction Diode라고 볼 수 있습니다. 그 性格은 잘 아시다시피 電壓의 Polarity에 依해 電流가 크거나 작거나 하므로 Switch에 適合한 것입니다. 그런데 On State에서 Off State로 Switch 하는데 必要한 時間을

Switching Speed라고 부르는데, Computer의 速度를 左右하는 것입니다.

p-n Junction Diode는 Switching Speed가 $1/10 \mu \text{ sec}$ (千萬分之 1秒) 程度 밖에 안되므로 高速度 Computer에 制限이 되고 있습니다. 그 理由는 On State 동안 흐르는 電流는 大部分이 Minority Carrier이며 그 흐름을 막는 데는 Minority Carrier의 life time에 해당하는 Transient가 必要한 까닭입니다. 여러분이 아시다시피 Minority Carrier lift time이 있어야 Transistor Action을 이룰 수 있는 것인데 Switching Diode의 경우에는 그로 말미암아 그리 좋은 結果가 아니 나옵니다. 그리하여 高速度의 Switching Speed를 이루기 위하여 金屬-半導體 Interface 研究가 約 5年前에 始作되었습니다. 그의 Switching Characteristics는 보시다시피 Minority Carrier Storage가 없기 때문에 約 千倍나 빠른(即 100億分之 1秒) 現象을 보여 줍니다. 이 所謂 Schottky Barrier Diode는 半導體 裝置中에서도 가장 簡單한 例에 드나 完全한 性格을 理解하기 위하여서는 많은 상세한 研究가 必要합니다. Schottky Barrier의 Energy Diagram을 살펴보면 Switching을 이해하는데 많은 도움이 됩니다.

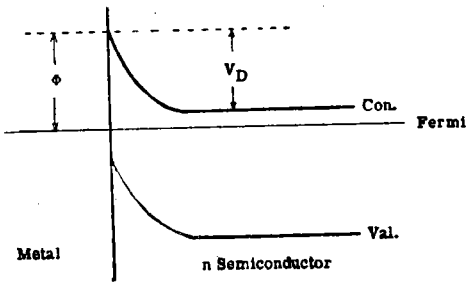
一般的으로 金屬과 半導體가 接觸하면 接觸面에 Potential Barrier가 생겨 보시다시피 半導體가 n-type인 경우에 이 半導體에 (-) 電壓을 주면 半導體속 에 있는 電子가 보는 Barrier가 줄



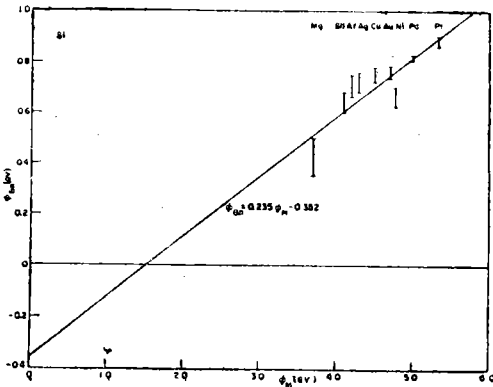
어들어 電流를 흘리게되나 (+)電壓을 주면 金屬속의 電子들은 同一한 Barrier를 향상 보고 있으므로 電流가 잘 흐르지 않게 되어 Rectification의 現象이 납니다. 이 狀態를 Off State라 부르는데 現象의으로는 電流가 全然 아니 흐르면 좋을 것이나 實際로는 微小한 電流가 흐르게 되는데 그 値는 Barrier Height ϕ 로서 決定됩니다.

보시다시피 電流는 全的으로 Majority Carrier에 依한 것이므로 Switching速度가 빠르게 됩니다. Barrier Height는 使用하는 金屬과 半導體에 依하여 決定되는데 또한 接觸面의 Surface State가 重要な 役割을 하며 실지의 Barrier 높이는 理論值에 比하여 적게 나옵니다. 理論的으로는 Barrier Height가 金屬의 Work Function의 差異만한 수 Volt값이 틀려져야 되는데 보시다시피 Barrier Height의 差는 겨우 半 Volt 정도 밖에 안됩니다.

Si의 경우에는 그래도 이러한 Work Function

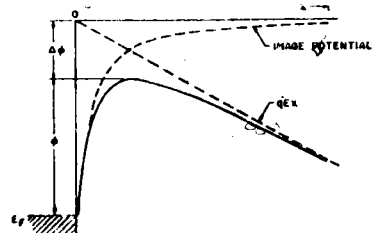
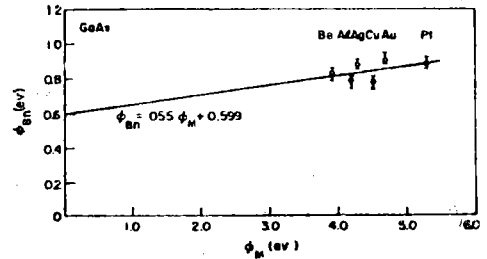


$$I_s = A_R T^2 e^{-\frac{q\phi}{kT}}$$



에 따른 現象이 나타남니다마는 다음 보시다시피 어떤 半導體의 경우에는 Work Function의 영향이 거의 없다시피 됩니다. GaAs와 Ge이 좋은 例로서 Surface State의 영향이 強力한 까닭이라 볼 수 있습니다.

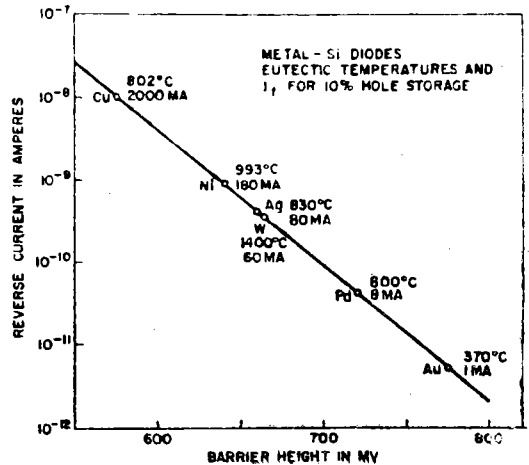
Barrier Height의 差가 半 Volt 밖에 안 되더라도 Reverse Current 即 Off State의 電流의 값은 큰 影響을 받게 됩니다.



$$\Delta\phi = \left(\frac{qE}{4\pi\epsilon_0 d}\right)^{1/2}$$

FOR UNIFORMLY DOPED SEMICONDUCTOR

$$\Delta\phi = \left[\frac{q^3 N (V + V_D - kT/q)}{32 \pi^2 \epsilon_0^2 \epsilon_s}\right]^{1/4} = \beta (V + V_D - \frac{kT}{q})^{1/4}$$



이 그림에 보시다시피 Reverse Current는金屬을 달리씀으로써 萬倍의 變化를 보여주고 있습니다. 따라서 正確한 Barrier Height의 測定과 또한 反復性 있는 實驗이 要求됩니다.

실상 接觸面 근처의 Potential 分布를 더 자세히 보면 2次的인 영향이 많이 있다는 것을 알 수 있습니다. 그의 一例은 Image Force의 영향인데 그 結果는 Barrier Height를 약간 낮추는 現象이 됩니다. Image Force는 물론 電壓의 函數이므로 電流도 역시 電壓의 函數로 나타나게 됩니다. 正確한 Image Force에 依한 Barrier Height는 Photo-electric Measurement로서 이룰 수 있습니다.

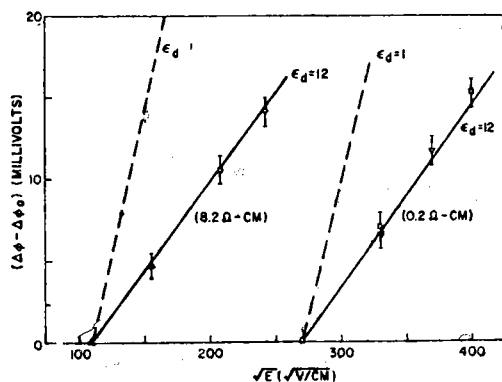
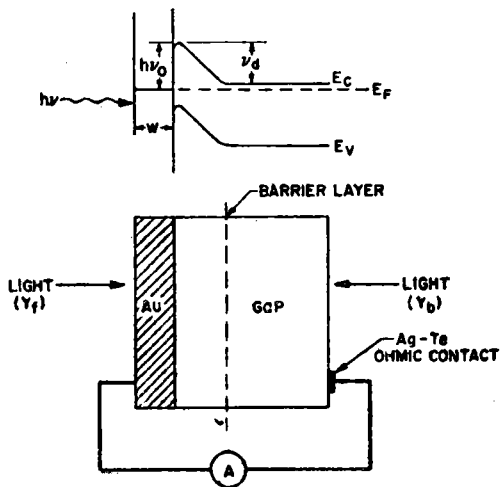
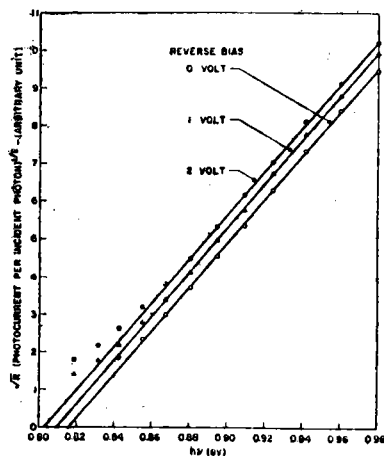
이 그림은 Photo-electric 測定裝置와 原理를 보여주고 있습니다. 金屬인 金과 GaP를 一例로서 쓰면 約 1.4Volt의 Barrier가 想起되는데 金を 얇게 約 100부터 500Å쯤 되게 하면 光線의 에너지로서 金屬部分에 있는 電子의 에너지를 올리는 同時에 Barrier를 정복하여 半導體쪽으로 흐르게 할 수 있습니다. 물론 光線의 에너지가 작으면 이런 現象이 안 날 것이며 어떤 Threshold Energy를 決定할 수 있으니 이것이 Barrier Height라 볼 수 있습니다. 이리하여 흐르는 電子流와 光線 Energy를 直結하는 實驗結果를 얻을 수 있으며 또한 電流는 金屬內의 電子 Energy State分布를 또한 反映함으로써 보시다시피 Square-root Law를 보여주게 됩니다.

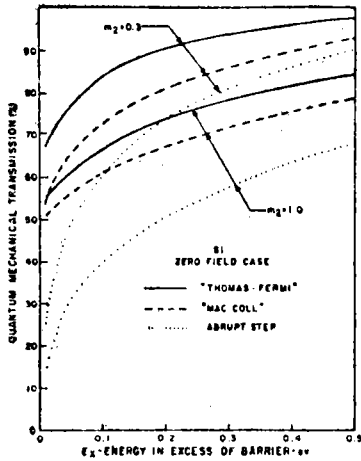
다. 이러한 點들을 使用하여 各電壓에 해당하는 Barrier Height를 測定할 수 있습니다.

이러한 測定量을 綜合적으로 보면 Image Force에 依한 Barrier 減小量이 約 10mV정도나 된다는 것을 알 수 있으며 또한 그 減小量은 Barrier內의 電場의 特殊函數로서 나타낼 수 있고 理論과 合致하는 結果를 보여 준다는 事實을 알 수 있게 됩니다.

Image Force에 依한 Off-State 電流의 變化量은 2.3倍 쯤 되니 그리 無視 못할 것입니다. 그 외에도 2次的인 變化가 있으니 그중의 하나는 量子力學的인 Reflection입니다.

보시다시피 電子가 Potential Barrier 근처로





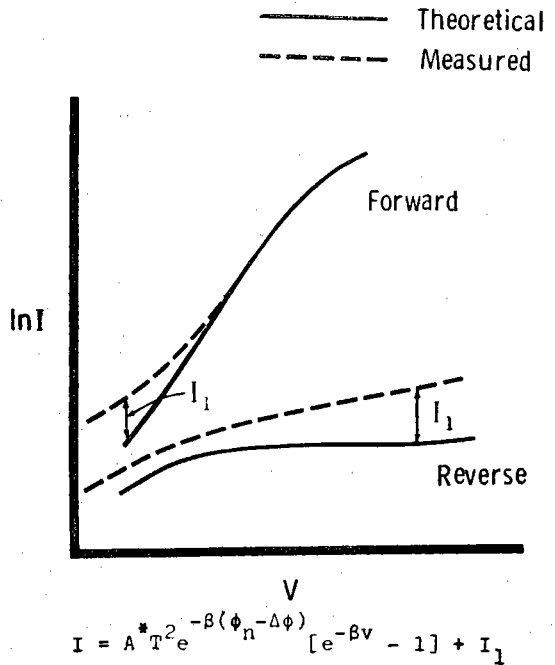
어느 정도 가까이 오면 一般적으로 Quantum Reflection을 當하게 되는데 이러한 現象을 計算해 보면 多幸히도 그 영향은 電流의 값을 10%로부터 30% 정도로 變化시키는것 밖에 되지 않으니 실지 應用에는 그리 問題가 되지 않는다는 것을 알게 됩니다.

이렇게 여러가지 面으로 Schottky Barrier의 現象을 자세히 分析하여 이제는 問題가 解決되었다 하고 실지의 것을 만들어 보면 아직도 理論과 合致되지 않는 現象이 나옵니다.

보시다시피 실지로서는 理論值보다 많은 電流가 흐르게 되는데 그 理由는 거의 Leakage Current에 依한 것입니다. 이 Leakage Current는 接觸面의 非理想的의 狀態가 原因이 되는 것으로서 複雜한 化學的 性格을 띠고 있습니다.

보시다시피 실지의 表面은 理想的의 表面과 달라 많은 不純物을 가지고 있습니다. 이러한 不純物의 影響을 없게하는 한가지의 方法은 이 그림에서 보시다시피 金屬冶金學의 知識을 利用하여 이루어진 것입니다.

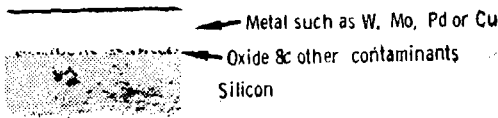
적당한 金屬과 Silicon은 比較的 低溫, 約600°C 程度에서 Solid-state Reaction을 보여 주어 Silicide를 만들게 되니 不純物을 重要한 Interface에서 구축할 수 있게 됩니다. 또한 外氣의



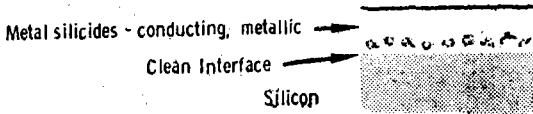
침범을 막기위해서 實用的인 Schottky Diode는 Oxide와 Pt나 金같은 作用度가 낮은 金屬으로 보호되어야 합니다. 그리하여 所謂 Planar Process를 使用하게 됩니다. 이러한 方法으로서 Computer Switching Diode나 或은 Varactor와 Varistor와 같은 應用을 이룰 수 있는 것인데 여태까지 말씀드리는 중에서 明白하게 나오는 結論의 하나는 아무리 간단한 電子裝置라도 完全한 理解가 있어야 實用的인 物品을 만들 수 있게 되고 또한 完全한 理解를 위해서는 物理學, 化學, 金屬冶金學, 物理化學등등 自然科學을 총망라한 知識이 必要하다는 點입니다.

III. IMPATT Diode

지금까지 말씀드린 電子裝置研究의 一例는 좀더 나은 System을 이루기 위하여 그 必要性이 動機가 되어 어떤 部分의 代置를 위한 研究라고도 볼 수 있습니다. 現存하는 固體電子裝置의 代置는 끊임없는 흐름이라 볼 수 있는데 또한

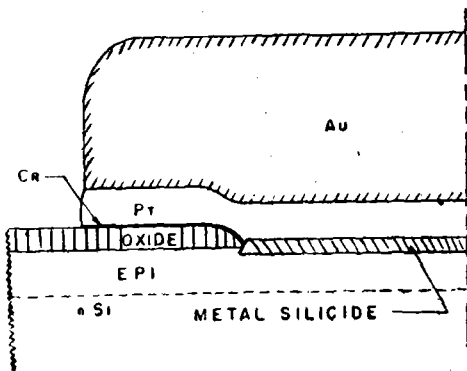


Heat Treatment at ~600°C.



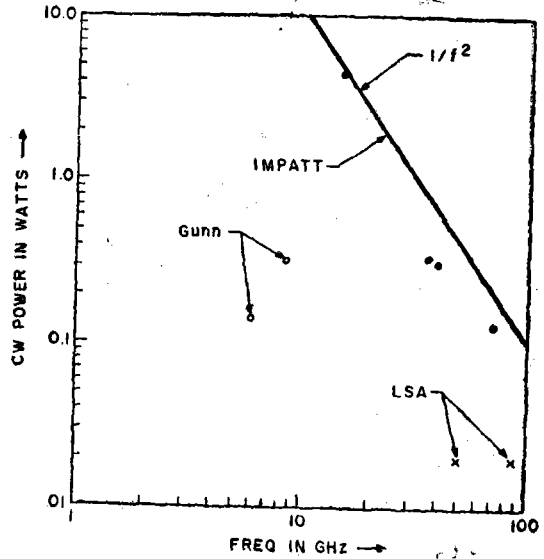
眞空管의 代置를 위한 研究도 꾸준히 進展되어 가고 있습니다. 여태까지 代置를 못하고 있는 眞空電子裝置의 하나는 電話網의 重要한 部分의 하나인 強力한 高周波發振器였습니다. 그러나 最近 3, 4年 동안 半導體 基礎特性 研究의 結果의 하나로서 所謂 IMPATT Diode라는 固體電子裝置가 탄생하였습니다. 또한 所謂 Gunn Effect를 利用한것, 그리고 그것과 흡사한 LSA Mode를 利用한 固體發振器가 등장하였습니다.

다음 그림에서 보시다시피 百億 사이클이라는 高周波도 1 watt만한 發振을 볼 수 있게되어 約 3000 이 IMPATT Oscillator의 原理를 보면 은 그 이름과 같이 Impact Ionization과 Transit Time이 두가지 큰 要素라 볼 수 있습니다. IMPATT Diode의 構造를 보면 各種이 있으나 모두 同一한 原理를 利用하게 되는데 우선 p-n Junction을 利用하여 高電場領域을 形成하고 그에 따른 Impact Ionization을 通하여 電子生産을 이루게 합니다. 이 電子들이 (+)電極쪽으로



10年間의 꿈이던 mm 그리고 Sub-mm波이 普遍化될 것 같습니다. 아마도 指數函數의 率로 늘어가는 通信의 必要性을 볼때 Laser가 實用的이 되기 힘든 이때 多幸한 일이라 볼 수 있습니다.

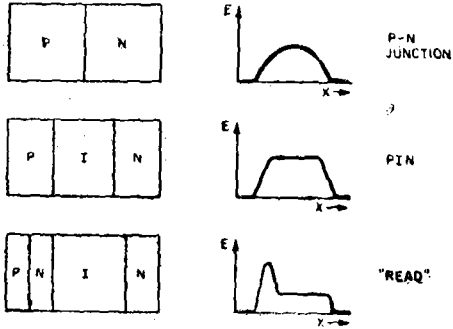
CW SOLID STATE OSCILLATORS - STATE OF THE ART



흐르기 始作하면 그 Space Charge의 影響으로 電場이 減少하게 되므로 兩電極間의 電壓이 떨어지게 됩니다. 따라서 電壓이 떨어지는데도 不拘하고 電流는 흐르게 되니 이것이 Negative Resistance라고 볼 수 있으며 또한 電子가 生産된 곳에서 (+)電極에 到達하는데 必要한 時間即 그 Transit Time을 적당히 調節하여 그와 相當한 Cavity 속에 집어 넣으면 Displacement Current의 억압속에서 Particle Current를 살려 낼 수가 있어서 發振狀態를 이룰 수 있게됩니다. 그러니 時間的으로 變하는 電場과 電子密度의 分布를 正確히 알아야 하겠는데 이것은 Computer를 使用하여 이룰 수 있습니다.

이 IMPATT Diode는 그림과 같이 PNIN+의 構造로서 N+領域은 사진의 左편이며 P 영역이 오른쪽입니다. 그림에서 올라 갔다 내려 갔다 하는 曲線이 電場分布이며 보시다시피 電

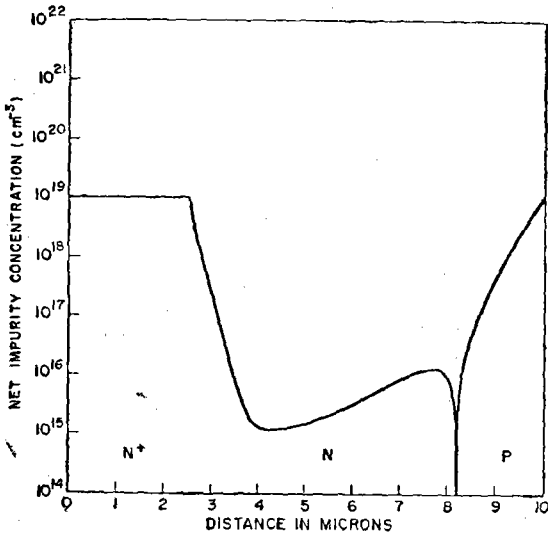
THREE CLASSES OF IMPATT OSCILLATORS



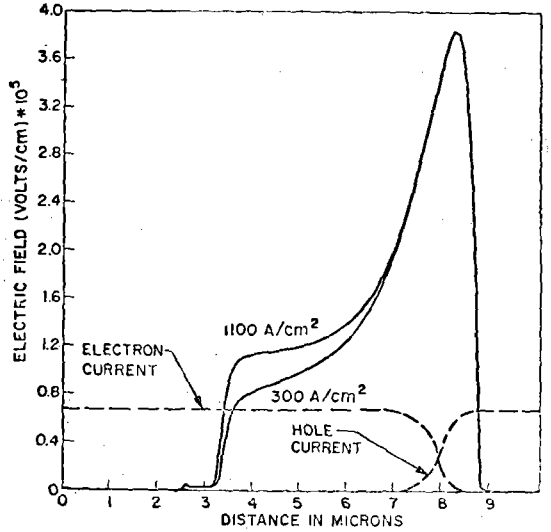
자는 왼편으로 흐르고 Hole은 오른편으로 흐릅니다. 그리고 그림에서 왼쪽 위 Corner 에 發振中の 電壓과 電流의 Phase Plot를 보여주고 있습니다. 電壓이 最適値를 가질때 Impact Ionization에 의한 電子와 hole의 生産이 電場이 가장 강한 오른편 p-n Junction 근처에서 始作이 되며 1/4사이클 후면 生産이 完成됩니다.

Hole들은 금방 사라지고 電子들은 왼쪽으로 흐르는데 약 1/2 Cycle의 時間이 걸립니다. 이러한 동안 보시다시피 電場은 大部分의 領域에서 감소되어 電壓이 낮아지고 있으며 다음 1/4

NET DOPING PROFILE VS DISTANCE READ DIODE 7A



ELECTRIC FIELD VS DISTANCE IN DC STEADY STATE READ DIODE 7A



Cycle 동안에는 남은 電子들이 다 없어지며 또한 電壓이 다시 오르기 始作하고 또한 電場이 強하게 始作하여 되풀이할 준비가 됩니다. 보시다시피 Particle Current, 卽 電子流와 電壓은 90° 以上 거의 180° 의 Phase差를 보여주시 이것이 즉 Negative Resistance의 現象입니다. 그러면 成功的인 電子裝置研究에는 正確한 必要性和 實地性을 파악한 아래서 自然科學 모든 分科를 총망라한 知識으로서 비로소 이루어 진다는 점을 다시 한번 強調하면서 끝마치겠습니다.

