

# 半導体프로세스技術의 現況과 将来

成 英 權

高麗大工大 教授

## 1. 序論

1959年 美国의 Texas社의 Kilby가 IC의 着相을 發表하고 잇달아 1964年 IBM社가 360시리즈 컴퓨터에서 SLT라는 하이브리드IC를 사용한 것을 契機로 半導体工業은 큰 變革을 거쳐, IC를 中心으로 大容量化 高密度化를 主要목표로 急速度로 發展하여 오늘날 国祭의으로 經濟 및 政治에까지 그 影響을 미칠정도로 되었다.

世界의 電子工業 發展過程을 돌이켜보건데 過去20年間 機器分野에서는 一般電子機器에서 産業用電子機器로, 電子部品에서는 電子管, 個別半導体에서 IC로 各各 主役의 位置 交替가 이루어졌다. 즉, 産業用에서는 컴퓨터를 中心으로 急速한 伸張을 보였고 電子部品에서는 디지털時代를 맞아 IC메모리를 中心으로 高度成長을 이루게 되었다. 또 家庭用電子機器에 있어서도 VTR을 필두로 컬러TV, 各種 音響機器와 더불어 順調로운 發展을 거듭하였고, 아울러 모든 人間 文化生活의 自動化를 期하는 推移를 보여주고 있다. 參考로 앞으로 予想되는 80年代의 一般用電子工業의 推移를 Electronic entertainment 特集에서 引用한 主要事項을 列舉하면 <표-1>과 같다.

이와같이 電子工業이 있어 半導体工業의 發展은 決定的인 役割을 다하며 原動力이 되어 있다는 것은 再言할 바가 아니다.

半導体工業의 發展現由로써는 少動作 에너지로서 小形의 디바이스가 된다는 것을 들 수 있으며 아울러 完全성이 높은 單結晶을 만들어 이것을 充分히 活用하는 技術과 研究가 거의 極限

点까지 發展하여 高信賴性, 高再現性이 있는 製造技術로 發展한 것이 最大要因이라고 할 수 있다. 즉, 近来의 半導体工業發展의 最大포인트는 單結晶技術의 展開에 걸리고 있다고 생각된다.

가령 多結晶의 경우 粒子의 크기는  $\mu m$  정도의 크기지만 이러한 多結晶膜을 어떻게 驅使하여  $\mu m$ 의 치수精度를 내고, 나아가 Sub  $\mu m$  加工을 행하는가, 또 이를 위해서는 多結晶膜을 어떻게 改造해 나갈 必要가 있는 가를 생각해 볼 必要가 있다.

이와같이 單結晶을 사용하는 半導体工業技術은 높은 信賴度, 再現性이 요구되는 近代 電子工業의 根幹이며 이것의 發展 原動力은 單結晶技術發展에 따르는 디바이스技術, 프로세스技術이며 그 中에서도 微細加工技術이라 불리는 photolithography 技術과 drydeposition 및 dry-etching技術 등, 一連의 프로세스 技術體系와 必然的으로 요구되는 얇은 接合技術이 그 바탕으로 되어 있다. 물론 各 프로세스技術은 回路技術이나 디바이스技術과 關聯없이 成長하는 것은 아니다. 가령 어떤 디바이스를 經濟的으로 市場에 出荷할 必要性에 의해 開發 또는 改良하는 프로세스 기술, 또는 比較的 長期的으로 내다보아 需要展望이 좋은 対象이 있으면, 이를 實現하기 위한 프로세스 體系中에서 各部分 마다의 프로세스開發이 이루어지는 경우도 있으나, 요컨대 새로운 微細加工技術의 登場에 의해 프로세스 技術에 큰 變革을 이끄는 契機가 되어 가장 時急한 開發課題로 되어있다.

표-1 豫想되는 80年代의 民生用電子 工業化

|      |   |
|------|---|
| 1982 | home 컴퓨터 network가 普及되고 文書와 文字를 電子的으로 送受信.<br>薄型 TV 発売.<br>受信機를 內藏시킨 実庭用 電氣機器 発売(home remote sensing.) |
| 1983 | 低料金家庭用 data bank service 始作. 双方向 TV보급.  |
| 1984 | TV 電話 보급. 薄型 컬러 TV 発売<br>出版社 在庫는 書店의 마이크로 필름에 記錄.<br>케이블 TV의 채널의 專問化.                                 |
| 1985 | 家庭用 facsimile 登場.<br>音声作動 家庭製品 普及.<br>薄型 color TV의 大型化.   |
| 1986 | 書店은 micro film에서 인스탄트 書籍 販売<br>音場開發裝置付 stereo 登場<br>大型薄型 TV 登場  |
| 1987 | 컴퓨터 data網을 이용한 music supply 登場<br>映像 pattern 發生裝置 登場  |
| 1988 | 高品位 薄型 TV 登場<br>팔목시계型 TV 登場   |
| 1989 | 薄型 Speaker 登場<br>주방용 컴퓨터 登場<br>立体 TV 登場   |

여기서는 半導體工業, 特히 IC의 經濟的인 背景은 各 專問家에 맡기고 筆者가 一年間 美, 日에서 두루 살핀 오늘날의 半導體工業 프로세스 技術의 現況과 將來의 動向에 對해 主로 디바이스의인 觀点에서 概設코져 한다.

## 2. 半導體프로세스技術의 指向目標

從來 IC의 初期에는 人間頭腦와 같은 數의  $10^4$ 정도의 cell을 가진 컴퓨터의 크기를 試算한 바 超 高層 빌딩의 數10배의 크기로 나와 驚탄한 것이었으나 오늘날에는 人間頭腦의 크기보다 더 작게 할 수 있는 可能性이 나타나 또 다시 驚탄하지 않을 수 없다.

光速과 같은 傳播速度로 假定하여도 150m 높이를 信號가 上下하는데 要하는 時間은  $1\mu\text{sec}$ 이다. 따라서 어떤 稀貴한 手法을 開發하지 않으면 信號를 읽어내는데  $1\mu\text{sec}$  以上の 늦음이 있는 한계에서 할 수 있는 演算의 基準時間은  $10\mu\text{sec}$  이상으로 하지 않을 수 없다. 따라서 작게

한다는 것은 그만큼 빠른 計算을 할 수 있다는 것으로 오늘날에는 演算速度가 n sec정도로 되어가고 있으나 無限히 빠르지는 할 수 없어 限界로서는 parking density를 크게 할 수 없기 때문에 그만큼 傳播時間을 輕減할 수 없게 된다. 結局 低電力化→packing density→高速化의 關係를 IC가 內包하고 있는 問題点이다.

그 外에 傳播速度는 光速으로는 到底히 되지 않으며 容量C와 抵抗 R 및 인덕턴스 L에 關係되어 대체로 傳播速度는  $(LC)^{-1/2}$ 로 된다. 여기서 L은 單位길이 당에 分布하는 인덕턴스 C는 單位길이 당에 分布하는 容量으로 線을 가늘게 하면 C가 작아지는 反面에 L이 커지게 된다. 따라서 半導體프로세스技術의 指向도 C나 R, L 등으로 低減시켜서 負荷를 가볍게하는 方向으로 하는 것이 必須的이며 여러가지 技術研究가 試圖되고 있다. 即, 接合技術로서 接合을 얇게하여 側面의 C가 간여하는 影響을 抑制하거나 微細한 에미터나 微細 pattern을 導入하는것도 C

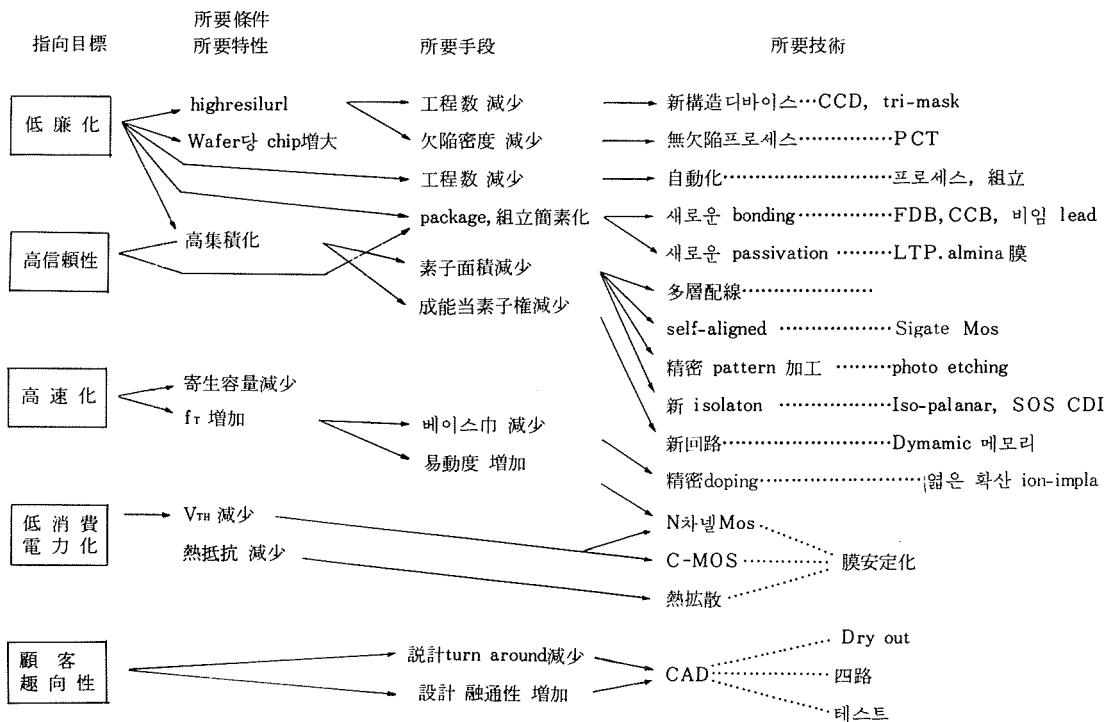
를 輕減시키는 것이다. 이 때문에 As擴散을 사용하는 技術이 常識化되어 0.5 $\mu$ m以下の 擴散層이 制限되고 있고 같은 目的으로 SOS (Silicon on Sapphire)技術이나 Iso-planar技術 및 IPOS 技術 등도 開發 또는 實用化되고 있다. 特히 Iso-planar 技術은 IC의 高集積化에 크게 波及效果를 일으켜 C-MOS IC의 高密度化에 크게 이바지하고 있다.

IC의 高集積化프로세스는 各個프로세스 技術이 處理室의 淸淨化技術을 포함한 均衡있는 体系로서 開發되어 나가는 것으로 마스크, lithography, 擴散-이온注入, 結晶, 測定, 디바이스構造 등 各 技術의 綜合的인 向上으로써 이루어지는 것인지 어느 것이라도 落後되면 高集積化는 디바이스機能의 高度化와 擴大化의 方法인 同時에 機能當의 低價格化를 期하게 된다. 따라서 프로세스技術의 開發과 發展은 低廉한 디바이스를 實現하기 때문에 美國이나 日本에서는

이에 指向하여 注力을 다하고 있다. wafer徑의 大型化 Chip面積의 縮少, self-aligned技術, 凹凸이 없는 素子構造의 實現 등 모두 어떻게 低廉하게 製造할 수 있는가의 追求이다. 新設된 라인은 모두 4 inch, 64K의 dynamic RAM으로 Chip面積은 30~35mm<sup>2</sup>로 놀랄만큼 작아지고 있다. 또 SiN이나 poly-Si를 利用하여 self-aligned技術이나 2層 poly-Si 配線技術, flat-MOS, flat bi-polar 技術의 低廉化에 크게 寄与하고 있다. 또 高集積化에 의해 外部 端子數의 增加가 鈍化하기 때문에 그만큼 IC의 信賴性도 飛躍的으로 向上되고 있다.

以上の 半導體, 特히 IC프로세스技術의 指向은 高性能, 高信賴性 및 低廉化의 세가지가 代表的이지만 이들이 모두 IC의 高集積化에 크게 依存한다. IC에 對한 所要目標, 問題點 및 이를 達成하기 위해 必要한 새 技術을 整理하면 <표-2>와 같다.

표-2 半導體 프로세스技術의 指向目標 및 所要技術



의 超高速IC project 계획 (VHSIC)을 시발로 地方自治體의 半導體産業에의 back up과 MIT,

Californiat Stanford大, Cornell大 등 各大學에 設置된 半導體研究所의 back up등 半導體企

이들의 實現을 위해 美國에서는 國防部 主催業의 地盤을 強化하는 세가지 움직임이 胎動하고 있다. 또 日本에서는 獨創적인 技術 開發을 目標로 新技術開發公團의 主導아래 活潑하게 半導體工業發展을 위해 努力하고 있는 중이다.

### 3. 氣上成長技術

氣相成長은 主로 半導體素子の 結晶成長과 多結晶의 堆積(deposition)에 나누어지나 結晶成長即, 氣相成長法은 IC의 其本材料인 Si에 限해서는 液相은 거의 活用되고 있지 않다.

氣相成長法은 主로 bipolar디바이스의 경우 必然적으로 거치는 工程으로 最近에는  $1\mu\text{m}$  정도까지의 얇은 成長層과 正確한 抵抗率의 制御가 요구되고 있다. 뿐만 아니라 低層抵抗의 埋込擴散이 要求되는 경우가 많다. 이들은 collector 抵抗을 低下시키기 위해 必要한 條件으로 얇은 擴散技術과 한쌍이 되어 디바이스의 高速性 實現에 有望한 프로세스이다. 이와같은 高精度氣相成長技術에 있어서는 欠陥密度的 減少와 mound의 除去도 要求된다.

一般的으로 氣相成長에 있어서는  $\text{SiH}_4$ 의 熱分解,  $\text{SiMCl}_3$ 나  $\text{SiCl}_4$  등의 水素還元法 등이 있으나 上述한 要求에 相應하는 良質의 結晶을 얻기 위해서 거의  $\text{SiCl}_4$ 의 水素還元法이 活用되고 있으나 그 理由는 明白하지는 않다.  $\text{SiH}_4$ 가 分解할때 HCl를 加하면 結晶性이 좋아진다고 하나 赤外線 吸取에 의한 調査에 의하면  $\text{SiCl}_4$  등의 塩化物이 發生하고 있기 때문에 塩化物을 媒介로 한 分解에 變化가 있기 때문이라고 생각된다.

Si의 氣相成長은  $\text{SiCl}_4$ 가 表面에 吸着하여 생기는 것이라는 說도 있어  $\text{SiH}_4$ 만으로는 表面吸着이 充分하지 않다고 生覺되나 HCl은 表面의 얇은 酸化層을 除去하는 作用도 있기 때문에 그 作用에 因한 것이라고도 생각된다.

여하튼 이 問題는 今後의 研究成果에 期待하여야 할 未解決의 分野이다.

結晶成長을 위해서는 우선 表面上에 原料 Si의 析出을 期하고 이들 Si의 原子, 分子가 表

面上을 泳動하여 Step이나 Kink 등의 安定點에 充分한 埋入過程의 이루어짐이 必須條件이며 이를 위하여 어느 程度의 溫度가 없으면, 泳動이 充分하지 않기 때문에 結晶의 成長速度에 알맞을 만큼 低下시킬 必要가 있다.

Si에서는 泳動距離는 대략  $1200^\circ\text{C}$ 에서  $20\mu\text{m}$  정도로 이 정도가 아니면 高品位 結晶은 만들기 어렵다. 最近 사파이어上에 分子線 epitaxy 로써 Si多結晶을 低溫成長시킨 例가 있으나 高溫으로 하면 Si과 사파이어가 相互擴散하므로 低溫에 의해 泳動이 減하는 分만큼 蒸着速度가 늦어진다고 推定된다. 이러한 경우 酸化시킬 우려가 있기 때문에 高真空을 必要로 할 것이다. 高品位 單結晶의 成長은 아직도 더 한층의 研究努力이 必要하며, 日本에 있어서는 이를 위해 82年度부터 新開發技術團에서 莫大한 研究費를 主로 半導體研究所 및 大學研究機關에 投資하여 研究에 着手하고 있어 그 成果가 期待 된다.

한편 反應成長 途中에 HCl을 注入해 주면 Si의 etching이 생긴다는 것이 알려져 成長시킨 Si는 廢棄物인 HCl을 빨리 除去하지 않으면 다시 腐蝕되어 버리게 된다. 또 原料成分이 反應에 의해 減少하는 것은 反應 即, 成長이 차츰 減少하게 되므로 成長두께의 不均一性을 일으키게 된다. 따라서 이를 防止하기 위해서는 注入가스의 流速을 올려 亂流를 일으키거나 screw를 回轉시키는 등의 處理가 行해지고 있으나, 가장 效果가 있는 것이 減壓이다. 不活性 가스나 水素에 稀釈시켜도 粒子의 平均 自由行程은 길어지지 않으나 氣壓을 내리면 平均 自由行程은 길어져서 境界層이 擴散하기 쉽다. 原料가스 成分의 供給도, 廢棄가스의 除去도 活潑해져 두께의 不均一性도 減少해 지기 때문에 앞으로 減壓 氣相成長이 널리 活用될 것으로 본다.

그 外에 問題가 되어있는 것으로서 表面에 吸着한  $\text{SiCl}_4$  등의 中間生成物이 어떤 過程을 거쳐서 格子內에 간여하는가가 흥미對象이 되어 있어, 오늘날 알려져 있는 것은 紫外線 照射效果가 있다는 것과 表面에 正孔이 存在하는 것이 反應을 促進한다는 것이다. 이들의 機構解明에

의해 앞으로의 技術進歩를 기대 한다.

또 無欠陥으로 制御性이 좋은 Sub  $\mu m$  두께를 制御하는 方法도 아직 解決 되어 있지 않으나 唯一한 可能性은 溫度cycle 法이다.

格子欠陥의 不整에 의한 轉位發生이 明白해져 그 補償도 할 수 있게 되어 巨視적으로 轉位の 發生을 抑制할 수 있게 되었다. 最近에는  $10^{16}/cm^3$  정도의 炭素와  $10^{17}/cm^3$ 의 酸素 doping에 의해서 畵이 현저하게 減少됨을 發表하고 있다.

그러나 여전히 사파이어와 같은 絶緣物 위에 Si를 成長시키는 reotaxial 成長이 囑望되어 있다. 그러나 같은 結晶系의 III-V 族間化合物로서 구성되는 hetero epitaxy에 대해서 겨우 不整問題가 중요시되고 있는 現狀이고 整合度도 대단히 낮은 狀態이므로 다른 reotaxy 成長에서는 거의 未開拓의 상태라 할 수 있는 部門이다.

#### 4. Dry 프로세스

半導체프로세스技術 中の 均別法에는 오랫동안 機械研磨와 化學的etching에 의해 행해져 왔으나 近來에 와서는 가장 현저하게 進歩된 放電化學에 의한 Dry 프로세스가 대폭적으로 採用되고 있다.

원래 空中窒素의 固定과 같이 옛날부터 放電化學의 分野가 있었으나 別로 注目을 끌지 못하고 近來에 와서 電子的인 IeV의 에너지를 平均 에너지로써 지니게 하기 위해서는  $11,600^{\circ}K$  로

加熱한 경우의 平均運動 에너지와 같다는 점에 由意하여 다시금 放電化學이 再認識되어 오늘날에는 이를 積極적으로 利用한 소위 dry 프로세스技術이 活用되기 시작하여 淸淨한 環境 離持와 프로세스합理化 및 省資源 등에 커다란 效果를 거두고 있다. 이와같은 放電化學은 高溫化學에 対応하는 것으로 電子나 正負이온을 비롯하여 여러가지 準位の 勵起分子, freeradical 및 光子로 이루어진 플라즈마나 이온反應에 의해 이온을 충돌시켜 対象原子를 뛰어나가게 하여 除去, 均削시키고 또는 뛰어나온 粒子를 堆積(depositions)시키는 放式이다. 實際로 酸化物이나 窒化物膜의 堆積이나 膜의 etching 등에 活用되어 플라즈마化學이 從來의 Suttering 法보다 制御性을 갖춘 形態로서 薄膜堆積이나 表面加工의 最適手段으로서 많은 利點이 確認되어 半導체製造의 基本的인 프로세스技術의 하나로써 定着化되어 가고 있다. 그동안 裝置의 改良, 適切한 가스 選沢 및 使用條件 등의 여러 研究成果에 의해 未解決의 問題點을 內包시키면서도 適用範圍를 날로 擴大시켜 가고 있다. 이와같은(堆積이나)切削加工의 dry 프로세스를 整理하면 表-3과 같으나 現實의 프로세스技術은 決코 單純하지 않고 여러 組合에 의한 經驗的 實驗으로 技術追求가 行해져 왔기 때문에 그만큼 아직도 技術의 再現性이 弱하고 發展을 阻害하는 要因으로 되어 있다.

表-3 Dry 프로세스

| 衝擊 粒子      | 切削또는除去         | 除去 物質                      | 堆 積              | 堆 積 物質                                  |
|------------|----------------|----------------------------|------------------|---|
| 이 온(反 應 性) | 反應性이온 milling  | Si, N, Al SiO <sub>2</sub> | 反應性 蒸着           | Ga As 酸化膜<br>SiO <sub>2</sub>           |
|            | 反應性 sputtering | 其他金屬                       | 反應性 sputtering堆積 |   |
| 이온(無反應性)   | 이온 milling     | resist의 選沢                 | Sputtering 堆積    | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub><br>磷유리 膜 |
|            | sputtering 切削  |                            | 이온 蒸着            |   |
| 勵起中性粒子     | 프라스마化學 etching |                            | etching          |   |

처음에는 極板上에 놓은 被加工物을 加工시켰으나 基板이나 對向電極이 同時에 suttering 되거나 腐蝕되어, 被加工物에 附着하거나 影響을 주는 危險이 뒤따랐다. 最近에 마이크로 波

를 印加하여 電子의 往復運動에 의해 電極에 衝突하지 않고 原子, 分子를 勵起시키는 方式과 開發되어 比較的 明白히 sputtering과의 分離가 可能해졌다.

表 4. 選沢 Dry etching의 例

| 裝置形式  | etching 가스   | 內 容                                      |
|-------|--|--|
| 平行平板型 | CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>                              | SiO <sub>2</sub> , Si의 etching 速度를 實現    |
| 円筒型   | CCl <sub>4</sub>   | 円筒型裝置에서의 異方性 etching                     |
| 平行平板型 | Cl <sub>2</sub> , HCl, Br <sub>2</sub> , CCl <sub>4</sub>                    | Al의 CCl <sub>4</sub> 에 의한 選沢 etching     |
| 平行平板型 | CF <sub>4</sub> , CHF <sub>3</sub>   | 가스의 差, etching 조건 差에 의한 選沢 etching.      |
| 平行平板型 | BCl <sub>3</sub> (其他)  | Al의 CCl <sub>4</sub> 에 의한 選沢 etching     |
| 이온비임형 | CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>                              | Si, SiO <sub>2</sub> , resistor와의 選沢     |
| 平行平板型 | CF <sub>4</sub> (+O, H, N, H <sub>2</sub> O, C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> ) | 가스 혼합에 의한 各種材料의 etching 速度, 選沢성의 變化      |
| 平行平板型 | CF <sub>4</sub> , CF <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>                            | Si, SiO <sub>2</sub> 의 異方性 etching       |
| 円筒型   |  | 抵周波放電의 使用                                |
| 이온비임형 |  |  |
| 円筒型   | SiF <sub>4</sub>   | Si, N, Si, SiO <sub>2</sub> 의 etching 速度 |
| 平行平板型 | CCl <sub>4</sub> , SiCl <sub>4</sub> , PCl <sub>5</sub>                      | Si의 異方性 etching                          |
| 平行平板型 | CBrF <sub>3</sub> (其他)   | Si의 選沢 etching 및 Si의 異方性 etching         |

이온을 사용하면 sputtering 뿐만 아니라 供給方向도 選沢性이 있기 때문에 大端히 깊은 溝(dip)를 窪어낼 수가 있으나 이 경우에는 마스크가 마땅히 필요하게 된다. 마스크 材料와 (Si 등)의 素材의 切劑速度比가 큰것을 攄하여 가스와 잘 견주어 사용하여야 한다. 그 例를 圖 4에 나타내어으나 嚴格히 말하면 이온의 경우 荷電電荷數, radical의 경우 勵起準位의 種類에 따라 etching 速度가 變化하므로 將來 이들의 값은 더 淸楚 改良될 여지가 있을 것이며 일단, 어느정도 反應을 일으킨다음 두번째의 反應을 일으키는 경우도 있기 때문에 數% 정도의 中間反應에 寄与하는, 例컨데 酸素나 水素 등의 混入에는 細心한 註意를 要한다. 이들도 今後의 研究에 依存해야 할 發展이 期待되는 領域이다. 우

선 etching 速度比가 큰 가스나 마스크에 사용할 수 있는 材料를 探索하여 適當한 條件을 模索하는 것이 急先務의 研究對象이며 아울러 切削 깊이의 monitor 作成 方法도 主要 研究課題인 것이다.

한편 이 分野에서 重視해야 할 對象은 光反應이다. 이것은 마스크를 사용하지 않고 選沢性을 나타낼 수 있는 可能性이 있어 이온비임 衝擊法과 더불어 今後 resist가 없는 方式이 開發될 可能性이 있다. 卽, 擴散마스크의 酸化物 등은 光照射 dry etching이나 이온비임 etching으로 切削拔取할 수 있는 可能性이 있으며 나아가 不純物擴散 自体 이온注入法으로의 代替도 可能해 지는 것이다.