

# 엑사이머·레이저의 研究와 應用

李 柱 熙  
(慶熙大 理工大 教授)

## ■ 차 례 ■

- 1. 概 況
- 2. 엑사이머·레이저 勵起過程
- 3. 엑사이머·레이저의 大出力化
  - 3.1 電子빔 勵起레이저
  - 3.2 放電勵起 레이저
  - 3.3 Blue-Green 레이저
- 4. 엑사이머·레이저의 産業界應用
  - 4.1 微細處理 加工
  - 4.2 材料의 精製·合成
- 5. 展 望
  - 參考文獻

### □ 概 況

지금까지 開發된 많은 種類의 레이저는 milli 波에서 紫外域에 이르는 넓은 領域의 波長을 거의 完全하게 커버하고 있음에도 不拘하고, 最近 新레이저를 開發하려는 企圖는 더욱 活潑하다.

이의 主要因은 첫째 慣性核融合用的 드라이버로서 高効率·大出力의 레이저를 開發하려는 것과 둘째는 物理·化學의 基礎研究와 光化學 및 半導體加工등의 應用分野에서 規待하는 紫外域~X 線의 短波長레이저의 開發에 있다.

最近 新레이저로서 注目を 받는 紫外域波長의 엑사이머·레이저(Excimer Laser)는 1971年 Basov 등<sup>1)</sup>에 의하여 처음 發振에 成功하였으며 液體Xe<sub>2</sub>를 電子빔으로 勵起하여 173nm 근치의 波長을 얻었다. 그 以後 계속해서 1970年代中에 希가스·엑사이머(Ar<sub>2</sub>126nm<sup>2)</sup> 등, 希가스·酸素엑사이머(XeO 540nm<sup>3)</sup> 등, 希가스·하라이드엑사이머(ArF 193nm<sup>4)</sup> 등, 및 水銀·하라이드엑사이머(HgI 444 193<sup>5)</sup> 등의 레이저 媒質에 의하여 發振되었다. 이것 들은 紫外域에 거의 等間隙으로 分布되어 있고, 또한 大部分 電子빔 勵起方式에 의하여 確認되었다.

現在 엑사이머·레이저의 研究는 주로 希가스·하

라이드系를 中心으로 發展하고 있다. 特히 希가스·弗化物레이저는 代表的인 엑사이머·레이저로 알려져 있다.<sup>7)</sup> 가장 高効率·大出力은 KrF (248 nm) 레이저이며 LLL의 Goldhar 등<sup>8)</sup>은 '84 CLEO 에서 電子빔 勵起方式으로 850 joule, 150 ns (FWHM)의 出力을 얻었음을 報告할 豫定으로 있다.

엑사이머·레이저의 實用化에 不可缺한 高効率·大出力 및 長壽命의 문제를 解決하기 위한 基礎研究는 發振過程 및 勵起技術과 이의 周邊技術등을 中心으로 推進중에 있다. 또한 産業化를 捉進하기 위하여 光勵起와 光化學, 同位元素의 分離와 濃縮, IC 마스크 및 核融合등에 대한 開發研究 역시 活潑하다. 本稿에서는 이와 같은 研究의 現況과 應用展望에 대하여 簡單히 서술한다.

### ② 엑사이머·레이저 勵起過程

엑사이머의 뜻은 勵起狀態는 安定되어 있으나 基狀態는 不安定하여 解離를 쉽게하는 分子의 경우이다. 처음은 두개의 原子 또는 原子團이 서로 相異한 것을 exiplex 또는 hetro-excimer 로 불렀으나 지금은 異核 同核의 區別없이 엑사이머로 通稱하고 있다. 典型的인 엑사이머의 potential曲線은 그림 1에 表示함과 같고 所謂 Bound-free遷移에 의하여 發

표 1. 희가스·하라이드엑사이머의 發振波長과 에너지·레벨

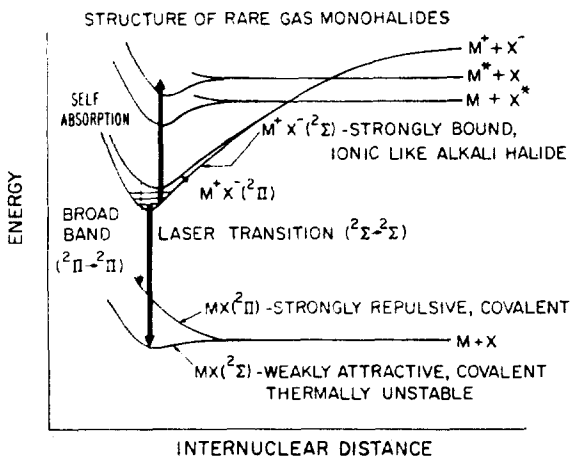
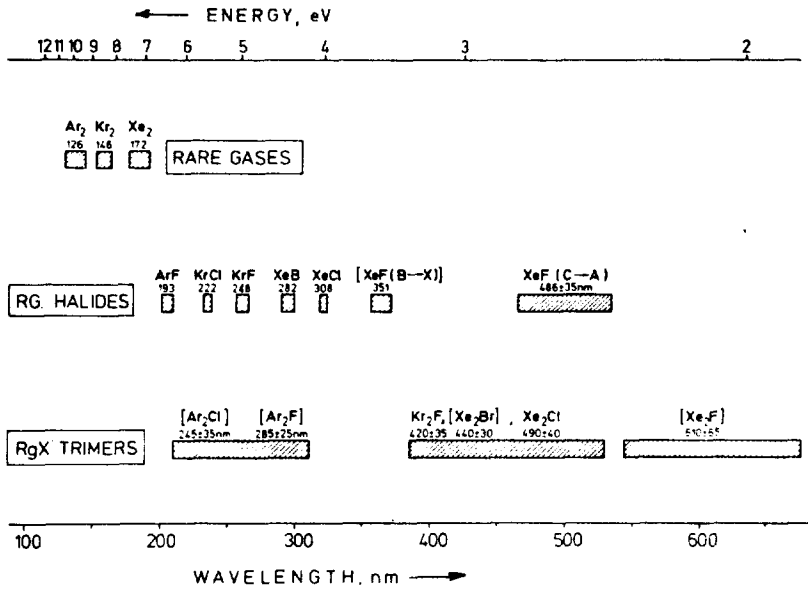


그림 1. 희가스·하라이드계의 代表的인 Potential 曲線

振한다. 이와 같이 上位安定項을 表示한 Potential 曲線의 極小点 밑에 下位項 Potential 曲線의 急傾斜部分이 있을때  $h\nu_0$ 의 빛을 放出하고 分子는 下位項에 떨어지면 熱運動에너지 보다 큰 運動에너지를 가지고 두개의 原子로 解離된다. 따라서 上位項의 最低振動單位 사이에는 逆轉分布가 發生하고  $h\nu_0$ 를 中心으로 하는 線幅으로 發振을 한다. 이 線幅은 下位

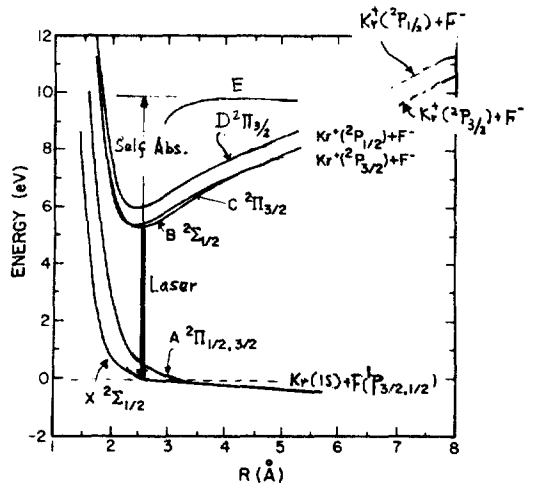


그림 2. KrF의 Potential 曲線, Dunning 등의 계산<sup>9)</sup> 및 Shimanchi 등<sup>7)</sup>의 實驗에 의한

項의 Potential 曲線의 傾斜가 급할 수록 넓다. 엑사이머·레이저의 特徵은  $h\nu_0$ 의 前後에서 連續의으로 波長을 變化할 수 있는 것에 있으며 이와 같은 同調可能範圍은 Potential 曲線의 傾斜程度에 따른다.

Dunning 과 Hay<sup>9)</sup>는 KrF의 Potential 曲線을 計算하였으며 이것은 Tellinghuism 등의 實測<sup>10)</sup>에 잘

一致된다. 그림 2에 表示된 Dunning 과 Hay의 KrF Potential 曲線에서 B→X 遷移는 249nm에 對應되고 가장 強力한 發振線이다. C項과 B項은 매우 近接되어 B→X와 C→A의 發振은 相互 競争되고 있음이 알려져 있다. B, C 및 D의 狀態는 이온性結合이므로 B, C는  $Kr^+(^2P_{3/2}) + F(^1S)$ , D는  $Kr^+(^2P_{1/2}) + F(^1S)$ 에 解離된다. M. Shimauchi의 報告<sup>7)</sup>에 의하면, 이들의 解離點보다 낮은準位에는 Kr의 第1 Rydberg項( $^4P$ )<sup>5</sup>S로 形成되는  $^3P_{210}$ ,  $^1P_0$ 項이 있고, 이것들과 F의 基底項  $^2P_{3/2}, ^2P_{1/2}$ 으로 이루어지는 여러項은 하나의 E項을 形成한다. E項의 Potential 曲線은 KrF의 自記吸收 過程을 갖음을 實驗으로 報告된 바 있다.<sup>11)</sup> 이와 같은 Rydberg項과 X와 A의 基底項은 中性的 K( $^1S$ )과 F( $^2P_{3/2}, ^2P_{1/2}$ )로 構成되므로 B→X 및 D→X 遷移 때 비로소 F에 附着된 電子는 Kr<sup>+</sup>에 移動되는 電荷移動遷移를 發生한다. 即 強力한 빛의 放射를 일으킨다.

電子빔 勵起 KrF 레이저의 勵起, 發振 및 吸收機構의 解明은 最近에 많은 進展을 이루었으며<sup>12)</sup>, 研究室레벨에서 工學레벨의 移行段階에 있다. 一般的으로 適用하는 勵起·發振過程은 表 2와 같다. 素過程은 ①Ar의 이온化와 Ar\*의 生成, ②Kr\*과 KrF\*의 生成, ③KrF\*의 發光과 quenching으로 分類된다. ①의 過程은 電子衝突에 關聯되므로 電子빔은 媒質의 이온化에 따라서 에너지로 손실된다. 即 媒質에 吸收되는 에너지  $P_i$ 는

$$P_i \approx eW_i R_i \approx J_{eb} S^{18)} \quad (2-1)$$

여기서  $eW_i$ 은 이온化로 因한 손실에너지(eV),  $R_i$ 는 이온化率(cm<sup>2</sup>/sec), S는 電子빔의 阻止能이다. (2-1)式으로부터

$$R_i = \frac{PJ_{eb}}{eW_i} \left( \frac{S}{\rho} \right) \quad (2-2)$$

여기서  $\rho$ 는 媒質의 密度,  $(S/\rho)$ 는 理論式<sup>18)</sup>으로 表示되어 電子빔의 加速電壓의 函數로 주어진다. 다음 KrF\*는  $Ar^* \rightarrow Kr^* \rightarrow KrF^*(5+8)$ ,  $Ar^* \rightarrow Ar_2^* \rightarrow Kr^* \rightarrow KrF^*(6+7+8)$ ,  $Ar^* \rightarrow ArF^* \rightarrow KrF^*(9+10)$ 등의 過程에 의하여 生成된다. 各過程의 配分比에 대한 것은 調査中에 있으나, 媒質에 吸收된 에너지의 22%는 KrF\*의 生成에 寄與한다.<sup>19)</sup> 최근 KrF의 quenching 機構에 대한 研究는 詳細한 領域에까지 이르고<sup>10)</sup>, 反應生成物과 反應定數는 測定되었다. 全壓 3 氣壓, 混合比 Ar/Kr/F<sub>2</sub> = 91.7% / 8% / 0.3%의 경우 F<sub>2</sub>와의 2體衝突과 Ar과의 3體衝突에 의한 quenching의 比率은  $2 \times 10^8 / S$ ,  $5 \times 10^8 / S$ 이다.<sup>20)</sup> 이에 比하여 自然光은 1~2×

표 2. KrF 레이저의 勵起 및 發振過程

反 応	定 数	文献
Ar*의 生成		
(1) e + Ar → e + Ar*		
(2) e + Ar → Ar <sup>+</sup> + e		
(3) Ar <sup>+</sup> + 2Ar → Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> + Ar	2.5 × 10 <sup>-31</sup> cm <sup>6</sup> /s	b)
(4) Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> + e → Ar* + Ar	7 × 10 <sup>-7</sup> cm <sup>3</sup> /s	b)
Kr*과 KrF*의 生成		
(5) Ar* + Kr → Ar + Kr*	~10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> /s	a)
(6) Ar* + 2Ar → Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> + Ar	1 × 10 <sup>-32</sup> cm <sup>3</sup> /s	b)
(7) Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> + Kr → 2Ar + Kr*		
(8) Kr* + NF <sub>3</sub> → KrF* + NF <sub>2</sub>	2.6 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> /s	a)
(8') Kr* + F <sub>2</sub> → KrF* + F		
(9) Ar* + F <sub>2</sub> → ArF* + F	~1 × 10 <sup>-8</sup> cm <sup>3</sup> /s	c)
(10) ArF* + Kr → KrF* + Ar		
KrF*의 發生과 quenching		
(11) KrF* + F <sub>2</sub> → product	8 ± 1 × 10 <sup>-10</sup> cm <sup>3</sup> /s	d)
(12) KrF* + 2Kr → Kr <sub>2</sub> F* + Kr	6.5 ± 0.5 × 10 <sup>-31</sup> cm <sup>6</sup> /s	d)
(13) KrF* + Kr → product	< 2 × 10 <sup>-12</sup> cm <sup>3</sup> /s	d)
(14) KrF* + 2Ar → ArKrF* + Ar	1 ± 0.2 × 10 <sup>-31</sup> cm <sup>6</sup> /s	d)
(15) Ar* → Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup> → ArKr* + Kr <sub>2</sub> <sup>*</sup>		
(16) KrF* → hν + Kr + F	τ = 6.5 ~ 20 ns	e)

a) ref 13.      b) ref 14.      c) ref 15.  
d) ref 16.      e) ref 17.

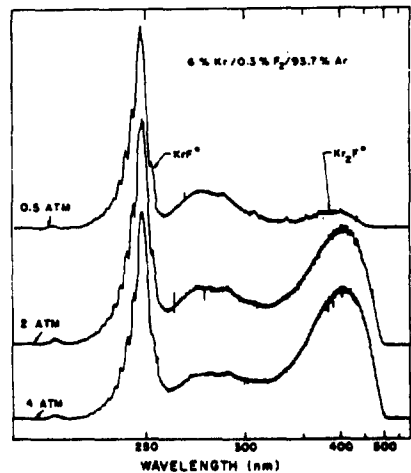


그림 3. 여러가스壓에서 KrF의 스펙트럼

10<sup>8</sup>/S 정도이다. 따라서 高効率의 레이저發振을 얻기 위하여 共振器內的 레이저光 強度를 세게해야 한다.  $\sigma = 5 \times 10^{-17} \text{cm}^2$ <sup>18)</sup>,  $I = 10 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ 의 경우 誘導放出의 比率은  $6 \times 10^8/\text{S}$ 이다.

大出力·短펄스를 얻기 위한 電氣빔勵起 엑사이머·레이저에 對應되는 것은 長펄스 또는 高速 반복動作을 할 수 있는 放電勵起엑사이머·레이저이다. 放電勵起는 XeCl 레이저(308nm)를 對象으로 現在 研究가 活撥하다. 이것은 하로겐·도너로 HCl을 使用하므로 KrF 때의 F<sub>2</sub>에 比하여 裝置의 腐食 및 gas의 劣化등에 有利하다. 따라서 長壽命의 반복動作에 適合하다. 波長은 KrF에 比하여 60nm 長波이므로 光學素子の 光損傷 threshold 値가 높다. 또한 放電은 比較的 安定하고 長펄스勵起를 可能하게 한다. 放電勵起에 의한 反應生成機構는 前述한 바의 電子빔勵起의 경우처럼 이온Channel이 優先은 아니고 準安定狀態過程 即 metastable channel이 支配的이다.

表 1에 表示된 發振觀測된 때와 거의 同時에 스펙트럼과 Potential의 安定, 反應(衝突)素過程의 研究가 急速히 進展하고 있다. 現在까지 XeF<sup>21)</sup>, KrF<sup>9)</sup>, XeI<sup>22)</sup>의 Potential 曲線은 決定되었고, KrF<sup>19)</sup>, XeF<sup>13)</sup>, XeBr<sup>23)</sup>등에 對한 反應의 素過程은 어느程度 調査되어 있다.

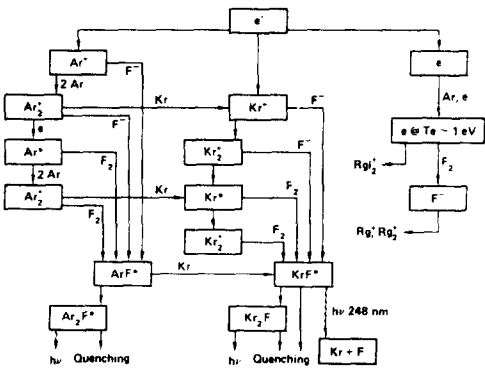


그림 4. 電子빔 勵起 Ar/Kr/F<sub>2</sub> 混合가스때 動特性모델의 흐름

### 3 엑사이머·레이저의 大出力化

#### 3.1 電子빔勵起레이저

前述한 바와 같이 KrF 레이저大出力化는 勵起, 發振, 吸收等 機構의 解明과 大強度電子빔의 發生技術의 確立段階에 있으므로 現在核融合用 大出力短펄스 KrF 레이저 建設을 위한 技術開發의 段階에 있다.

美國 Sandia 國立研究所는 100kj 增幅器를 위한 電子빔裝置 RAYO (1MV, 200ns, Z<sub>0</sub> = 3ohm) 開發計劃을 갖고 있다. 이의 豫備段階로서 RAYTIO (0.8 ~ 1MV, 50 ~ 200ns, Z<sub>0</sub> = 2 ~ 4 ohm)을 推進중이고 斷面積(30×100cm<sup>2</sup>)이 均一한 電子빔의 發生實驗을 行하고 있다.

또한 LLL는 RAPIER (Raman Amplifier Pumped by Intensified Excimer Radiation)을 高効率·短펄스·레이저·시스템으로 開發中에 있고 이의 B 增幅器는 6개빔의 兩面打込方式, 레이저出力은 500 joule을 想定하고 있다.

英國의 Rutherford 研究所는 250 joule KrF 레이저實驗을 위하여 4面打込方式의 SPRITE (1MV, 60ns, Z<sub>0</sub> = 5 ohm)을 建設하고 豫備實驗에서 160 joule의 出力을 얻었다. 더욱이 現在의 工學레벨에서 50kj module의 設計를 하고 있으며 電子빔의 發生技術과 KrF 레이저特性의 兩面에서 短펄스化 시스템을 包含한 總括的인 시스템의 檢討를 하고 있다.

日本은 橫打込電子빔勵起KrF 레이저의 電子빔guide 磁界의 效果<sup>24)</sup>, KrF 레이저의 勵起 및 吸收 등 特性<sup>25)</sup>, 勵起素過程의 測定<sup>26)</sup> 등의 基礎研究를 中心으로 推進되고 있다. 또한 縱打込方式電子빔裝置(2MV, 100KA, 65ns)로 KrF 레이저 100 joule의 出力을 發生하였다.

레이저核融合用の 드라이버로서 電子빔勵起KrF 레이저의 開發研究에 併行하여 XeCl의 研究도 進行되었으나, XeCl 레이저는 効率 4 ~ 5%<sup>27)</sup>로 限定되어 KrF 레이저의 効率 10 ~ 15%<sup>28)</sup>에 比較되지 않은 관계로 研究가 中止된 狀態에 있다.

#### 3.2 放電勵起레이저

放電勵起엑사이머·레이저에는 XeCl을 主로 研究하고 있다. 최근 希가스로 Ne을 使用하여 放電均一性이 大幅 改善되고 펄스幅이 넓어져서 He希釋의 2배 이상 効率을 얻었음이 報告되었다.<sup>28) 29)</sup>

한 理由는 希釋가스에 의한 電子의 速度分布定數의 差異에 있다. He에 比하여 Ne은 電子分布가 에너지의 큰쪽에 기울어져 있으므로 彈性損失이 매우 적고 勵起效率이 좋다. 또한 레이저媒質에 의한 自己吸收는 적어서 出力效率이 上昇하는 것도 出力增加의 한 原因이다.

豫備電離方式은 X線이 主流를 占하는 경향이다. USNRL의 Wexler 등<sup>30)</sup>은 10×7.5cm<sup>2</sup>의 放電斷面積裝置를 報告하고 있다. Levatter 등<sup>31)</sup>은 X線豫備電離를 使用하여 低密度入力勵起(600MW/e)때 200

ns의 XeCl 레이저를 效率 4%에서 얻었다.

X線豫備電離는 UV豫備電離에 比하여 보다 均一한 豫備電離를 할 수 있고, 豫備電離源이 레이저管의 外部에 있으므로 스퍼크에 의한 가스의 劣化와 不純物의 混入이 防止되는 利點이 있다.

高速反復動作의 경우 問題되는 것은 ①高速充電方法, ②高速反復·高速 rise time大電流펄스發生方法 ③펄스回路의 사이라트론의 壽命, ④高速均一 gas flow 技術등을 들 수 있다. 그러나 技術開發에 의하여 平均 100W 以上の 裝置開發이 活潑하게 進行되고 있다. 現在까지 가스의 劣化, 레이저管의 腐食, 스윗치의 壽命등이 問題가 된다.<sup>32)</sup> 더욱이 主放電 및 豫備電離源에 의하여 생기는 鹽化炭素, 金屬의 鹽化物 및 HCl 등은 光學系에 付着되어 이의 性能을 低下시키므로 Ni 도금金屬과 세라믹材를 使用하여 對策을 강구하고 있다. gas flow의 均一化와 音響Damper 에 의한 媒質密度變化의 低減, 注入同期不安定共振器를 使用하여 빔의 拡散角을 回折限界의 3배까지 低下시켰음을 MSNW社는 報告하였다.<sup>33)</sup> 또한 UV豫備電離를 X線으로 代替할 것을 採択하고 있다.

### 3.3. Blue-Green 레이저

500nm 波長은 水中의 傳播特性이 우수하므로 美海軍을 中心으로 開發研究를 強力히 推進中이다. USDARPA發表에 의하면 레이저發振器를 地上에 設置하고 衛星의 反射鏡으로 水中에 傳播시키는 方法과, 衛星에 搭載하여 直接 水中에 傳播시키는 두 種류의 시스템이 研究중이다. 高速反復·電子빔勵起 XeF 레이저에 의한 H<sub>2</sub> 라만·레이저 (EMALD), 後者는 X線豫備電離에 의한 放電勵起 HgBr 레이저 (phase II)로 各計劃되고 있다.

XeF 레이저勵起 H<sub>2</sub> 라만·레이저는 Stokes Shift 가 4,155 cm<sup>-1</sup>으로 적은 관계로 2次 Stokes光으로 變換하여야 한다. Komine 등<sup>34)</sup>은 電子빔 勵起 XeF 레이저를 使用하여 波長 500nm의 2次 Stocks光 1.7 joule을 變換效率 34%에서 얻었다. 이것은 펄스幅 ≥ 1 μs, 10 joule의 XeF 레이저로 H<sub>2</sub> 라만·레이저의 發振器와 增幅器를 同時에 勵起하는 방식이며 增幅器길이 5.8m, H<sub>2</sub> 壓力 7.8 氣壓이다.

## ④ 엑사이머·레이저의 産業界應用

### 4.1 微細處理加工

有機金屬의 Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> 및 Cd(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 등은 吸收Peak 는 200nm 근처에 있다. 이와 같은 有機金屬은 ArF

레이저 (193nm)에 의하여 光解離를 發生하고 이때 遊離된 Al 및 Cd 原子는 基板위에 集積되어 金屬薄膜이 形成된다.<sup>34)</sup> 이와 같은 光解離는 光化學反應을 통하여 金屬膜, SiO<sub>2</sub> 膜<sup>35)</sup>, Si 또는 Ge 膜<sup>36)</sup>을 形成할 수 있다.

半導體加工의 各種工程에 엑사이머·레이저는 應用되기 始作하고 있으며 完全히 産業化될 때 需要는 매우 클 것으로 規待된다. 實際로 應用이 試圖된 몇 가지 토픽스를 다음에 例를 든다.

Lowndes 등<sup>37)</sup>은 XeCl 레이저를 使用하여 이온注入에 發生하는 실리콘結晶의 損傷回復을 調査하고 照射에너지強度에 따라 溶融의 깊이, pn接合의 生成은 制御可能함을 示顯했다.

또한 MIT Lincoln 研究所의 T. F. Deutsch 등<sup>38)</sup>은 集光된 엑사이머·레이저로 化學反應을 誘起하여 μm Scale의 Deposition 또는 Etching을 可能하게 했다. 이것은 標本基板의 極表面 근처에 集光된 엑사이머·레이저를 照射하여 光解離로 dopant를 生成시키고, 同時에 基板表面을 같은 레이저光으로 溶融하여 dopant를 擴散시키는 方法이다. 이 方法으로 高品質의 太陽電池의 製作이 可能하다.<sup>39)</sup>

### 4.2 材料의 精製·合成

集積回路 또는 太陽電池에 所要되는 SiH<sub>4</sub> 가스는 AsH<sub>3</sub> 및 PH<sub>3</sub>의 不純物을 包含하고 있다. 이와 같은 不純物은 엑사이머·레이저의 照射에 의하여 SiH<sub>4</sub> 가스에서 分離된다. 이것은 50ppm의 不純物濃度를 0.5ppm 以下로 低下시킬 수 있다.<sup>40)</sup>

合成化學用 混合가스(H<sub>2</sub>+Co)에 포함된 不純物 H<sub>2</sub>S를 光分解시키기 위하여 ArF 또는 KrF 레이저의 Raman-Shift 光을 利用하여 高純度精製하려는 試圖도 있다.<sup>41)</sup>

엑사이머·레이저 誘起化學反應에 의하여 鹽化비닐·모노마 등의 高分子材料<sup>42)</sup> 및 바이타민 D 등의 醫藥品<sup>42) 43)</sup>은 高收率合成이 可能하다. 普通 아아크·램프를 使用할 때 光化學프로세스에서 바이타민 D의 收率은 35% 였으나 엑사이머·레이저에 의한 光化學프로세스의 경우는 副產物없이 收率은 80%까지 向上된다.

## ⑤ 展 望

엑사이머·레이저는 처음에는 레이저核融合用的 新레이저·形態로 出發했으나, 현재 紫外域의 高効率·大出力레이저로서 레이저 自體의 넓은幅과 應用

에서 無限에 가까운 領域을 갖게 되었다.

그러나 現在까지 充分히 解明되어 있지 않은 特性이 있으므로 금후의 基礎研究에 規待해야 한다. 더욱 開發해야 할 新예사이머·레이저에 對하여도 原子分子分光 및 衝突, 反應등의 素過程등의 充實한 基礎研究가 必要하다.

勵起方式과 이의 周邊技術에서도 高效率·高反復의 技術과 目的에 副應되는 短·長波化, 增幅技術등 새로 確立해야 할 課題는 山積하다 할 수 있다.

예사이머·레이저의 應用技術 역시 開發段階에 있으나 分명한 展望은 첫째 科學技術分野에서는 同調可能色素레이저의 펄핑, 非線形分光學, 紫外域分光學, 光勵起 및 光化學, 同位元素의 分離와 濃縮등을 解明할 것으로 본다. 둘째 産業·技術分野에서는 金屬材料의 加工, 半導體 IC의 Patterning, Pattern의 Deposition, 레이저 Marking, 半導體 annealing, 金屬, 세라믹 및 프라스틱의 表面處理, 光化學, Atmospheric monitoring 등은 멀지않은 將來에 開發되어 人類에 貢獻할 것으로 믿는다. 이와 같은 展望은 UV時代의 到來를 豫見하는 것과 같다.

參 考 文 獻

- 1) N.G. Basov, V.A. Danilychev, and Y.M. Popov: Sov. J. Quantum Electron. 1 (1971), 18.
- 2) W.M. Hughes, J. Shannon, and R. Hunter: Appl. Phys. Lett. 24 (1974), 448.
- 3) H.T. Powell and J. Murray: UCRL-50021-76
- 4) J.M. Hoffman, A.K. Hayes, and G.C. Tisone: Appl. Phys. Lett. 28 (1976), 538.
- 5) R.W. Waynant and J.G. Eden: Appl. Phys. Lett. 33 (1978), 708.
- 6) J.J. Ewing and C.A. Brau: Appl. Phys. Lett. 27 (1975), 350.
- 7) M. Shimauchi: Rev. of Laser Eng. 8 (1980), 875.
- 8) J. Goldhar, K.S. Jancaitis, J.R. Murray, and L.G. Schlitt: '84 CLEO Advance Program Th B2 (1984. ).
- 9) T.H. Dunning and P.J. Hay: J. Chem. Phys. 69 (1978), 134.
- 10) J. Tellinghuissen, A.K. Hays, J.M. Hoffman, and G.C. Tisone: J. Chem. Phys. 65 (1976) 4473.
- 11) M. Shimauchi, S. Karasawa, and T. Miura: Jpn. J. Appl. Phys. 17 (1978), 527.
- 12) 例를 들면 日本, 電氣學會技術報告(Ⅱ部) 第 160 號, (1983. 12) 8. 43
- 13) J.A. Mangano, J.H. Jacob, and J.B. Dodge: Appl. Phys. Lett. 29 (1976), 426.
- 14) E.R. Ault, R.S. Bradford, and M.L. Bhaumik: Appl. Phys. Lett. 27 (1975), 413.
- 15) M.L. Bhaumik, R.S. Bradford, and E.A. Ault: Appl. Phys. Lett. 28 (1976) 23.
- 16) J.A. Mangano, M. Ronki, and J.H. Jacob: Digest of 5th conf. on chemical and Molecular Lasers (1977), 49.
- 17) 例를 들면 T.H. Dunning and P.J. Hay: Appl. Phys. Lett. 28 (1976), 649.
- 18) 例를 들면 G. Bekefi: Principle of Laser Plasmas (John Wiley & Sons, 1976) 389.
- 19) J.H. Jacob and J.A. Mangano: Appl. Phys. Lett. 27 (1975) 495.
- 20) S. Watanabe and H. Kashiwagi: Oyo Buturi Vol. 46, 10 (1977), 22.
- 21) C.A. Brau and J.J. Ewing: Appl. Phys. Lett. 27 (1975), 489.
- 22) J.J. Ewing and C.A. Bran: Phys. Rev. A12 (1975), 129.
- 23) G.A. Hart and S.K. Searles: J. Appl. Phys. 47 (1976), 2033.
- 24) F. Kannari et al: Rev. of Laser Eng. 10 (1982), 208.
- 25) F. Kannari, M. Obara, and T. Fujioka: J. Appl. Phys. 53 (1982), 135.
- 26) K. Ueda et al: Jpn. J. Appl. Phys. 21 (1982), L500.
- 27) G.C. Tisone and J.M. Hoffman; SAND 81 (Unpublished)
- 28) S. Watauabe, A.J. Alcock, K.E. Leopold, and R.S. Taylor: Appl. phys. Lett. 38 (1981), 3.
- 29) S. Watanabe and A. Endoh: Appl. Phys. Lett. 41 (1982), 799.
- 30) B.L. Wexler, N. Djeu, and R. Burnham: CLEO '82 Technical Digest WJ7.
- 31) J.I. Levatter, K.L. Robertson, and S.C. Lin: Appl. Phys. Lett. 39 (1981), 297.
- 32) R. Tennant: Laser Focus 17 (1981), 65.
- 33) S.R. Byron, S.E. Moody, G.J. Mullaney, and P.E. Cassady: CLEO '82 Technical Digest

WD4.

- 34) D.J. Ehrlich, R.M. Osgood, and T.F. Deutsch: Appl. Phys. Lett. 38 (1981), 946
- 35) P.K. Boyer, G.A. Roche, W.H. Ritchie, and G.J. Collins: Appl. Phys. Lett. 40 (1982), 716.
- 36) R.W. Andreatta, C.C. Abele, J.F. Osmundsen, J.G. Eden, D. Lubben, and J.E. Greene: Appl. Phys. Lett.: 40 (1982), 183.
- 37) D.H. Lowndes, et al: Appl. Phys. Lett. 41 (1982), 938.
- 38) T.F. Deutsch, J.C.C. Fan, G.W. Turner, R.L. Chapman, D.J. Ehrlich, and R.M. Osgood: Appl. Phys. Lett. 38 (1981), 144.
- 39) T.F. Deutsch, J.C.C. Fan, D.J. Ehrlich, G.W. Turner, R.L. Chapman, and R.P. Gale: Appl. Phys. Lett. 40 (1982), 40.
- 40) A. Hartford, E.J. Huber, J.L. Lyman, and J.H. Clark: J. Appl. Phys. 51 (1980), 4471.
- 41) H.L. Chen and C. Borzileri: IEEE J. Quantum Electron. QE-16 (1980), 1229.
- 42) A. Kaldor and R.L. Woodin: Proc. IEEE 70 (1982), 565.
- 43) V. Malatesta, C. Willis and P.A. Hackett: J. Am. Chem. Soc. 103 (1981), 6781