

## X-선에 대한 毛細管 光誘導光學

李 相 洙

한국과학기술원 물리학과

(1992년 4월 24일 받음)

레이저 플라즈마에서 放出되는 X-선의 이용이 크게 發展될 것이 豫測되나, X-선에 대한 光速의 視準化, beam homogenizing, 光速縮小, 光誘導 등이 어려워 豫想한 바 큰 發展이 이루어지지 못하고 있다. 이 難題를 解決할 수 있는 可能性이 毛細管光誘導光學(Kumakhov optics)에서 窺보기에 여기에 紹介하여 光學, 레이저 플라즈마 등을 研究하는 會員들의 關心을 끌고져 한다.

### I. 緒 論

에너지가 10 J, 펄스폭이 1~10 ns, 따라서 出力이 1~10 GW인 中級 레이저로써 우리는 쉽게 豊富한 X-선을 얻을 수 있다. 이러한 X-선과 photo-resist를 써서 生物學的 試料에 대한 接觸印刷을 하고, 이어서 腐蝕(etching) 과정을 거쳐서 走査型 電子顯微鏡으로 擴大된 사진을 얻을 수 있다.<sup>[1,2]</sup> 이 때 레이저 plasma X-선은  $2\pi$  立體角으로 發散하기 때문에 X-선 리소그래피의 경우와 같이 마스크가 數  $\mu\text{m}$ 의 浮刻(relief)이 있을 때 分解能에 큰 損失을 가져온다. 이 問題點과 X-선의 심한 吸收 때문에 membrane mask가 考慮되고 proximity exposure (近接露出) 등이 試圖되고 있으나, 根本的인 解決策이 되지 못하고 있다. 이러한 X-선 projection system을 쓰는 것이 좋다고 主張하는 사람도 있다. 이 方法에서 X-선의 反射率을 올리는데 크게 成功하였으며, 現在 MBE나 sputtering 장치를 써서, Mo과 Si의  $\frac{\lambda}{4}$  두께의 多重薄膜系를 이루어서 反射率  $R=0.6$ 을 얻고 있으나, 4번 反射하면 X-선 光速은 13%로 떨어진다. X-선은 吸收가 크고 또 coherence가 작기 때문에  $\frac{\lambda}{4}$  대신  $\frac{\lambda}{2}N + \frac{\lambda}{4}$ 의 薄膜을 이루어서는 안된다는 技術的 制約點이 薄膜 製作課程에 있다. 이와 같이 proximity exposure나 projection system이 다같이 隘路點을 지니고 있는 것은 適切한 X-선 光學이 아직 充分하게 開發되어 있지 않은데 其 原因이 있다.

이 原因이 除去되면 값싸고 손쉽게 레이저 플라즈마 X-선이 크게 利用될 것이다. 위에서 例를 들은 X-선 리소그래피는 레이저 플라즈마 X-선 응용중의 한가지에 不過하고 病院에서의 診斷, 治療는 말할 것도 없고, 材

料研究, 超精密非破壞檢査, 生物學研究, 結晶學研究 등등에 다같이 利用될 수 있다.

X-선의 反射率은 入射角  $\alpha$  (長波長領域에서는  $90^\circ - \alpha$ 를 入射角라함)가 약  $5^\circ$ 보다 작을 때 1에 가깝고,  $\alpha$ 가 증가하면서 急激히 減少한다. 다시 말해서 X-선이 잘 反射하려면, 入射面에 거의 平行하게 X-선이 들어가야 한다. 이 조건 아래서 毛細管系를 適切하게 이용해서 X-선 光速을 誘導하는 光學이 capillary light guide optics 또는 近年에 많이 研究한 蘇聯科學者(Kumakhov 原子力研究所)의 이름을 따서, Kumakhov optics라고 부른다. Capillary light guide 안에서 위에서 한번 反射하고, 이어서 아랫면에서 反射한 다음에 윗면으로 되돌아 올 때, X-선이 앞으로 나가는 거리는 약  $2 \times 0.1 \text{ cm} \times \frac{60^\circ}{4}$ , ( $\alpha = 4^\circ$ , 毛細管의 內徑=0.1 cm), 즉 3 cm가량이 된다. 따라서 10번 그러한 反射가 일어 났다면 거리가  $3 \text{ cm} \times 10 = 30 \text{ cm}$ 의 capillary가 必要하게 된다.

X-선은 可視領域의 光波에 比해서, 波動性이 弱하고, 粒性이 強하게 나타나기 때문에 可干涉性(degree of coherence)이 작은 값이 된다. 따라서 이 論文에서 光線으로서 X-선의 傳播를 取扱하겠다.

### II. Type-1 X-선 誘導管안에서 일어나는 X-선의 偏倚와 X-선 Collimator

가는 毛細管 light guide에 X-선이 入射角  $\alpha$  ( $\alpha < 5^\circ$ )로 들어가면 毛細管 上下面에서 反射하여 앞으로 傳播한다.

이때 毛細管을  $\beta$ 만큼 구부리면, 入射角은  $\alpha + \beta$ 가 되고, 이러한 구부림이  $N$ 번 있었다 하면 끝에 가서 入射角  $i$ 은  $\alpha + N\beta$ 가 된다. 但, 이 때

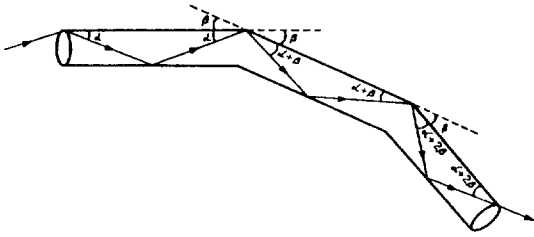


그림 1. Type-1 guide에서 일어나는 X-선의 반사.  $\alpha$ : 入射角,  $\beta$ : 접유 의 구부림 각도.

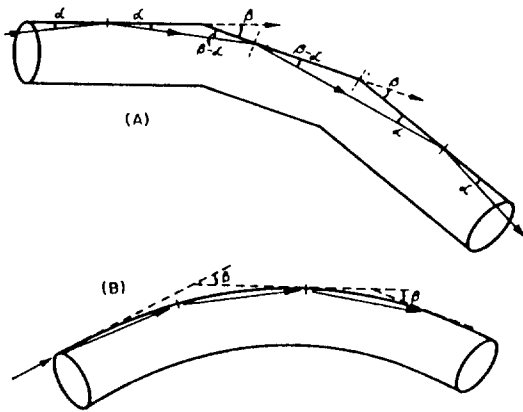


그림 2. Type-2 guide. 한쪽면을 달아서 X-선이 반사함.

$$i = \alpha + N\beta < 5^\circ \tag{1}$$

의 條件이 充足되어야 한다. 이어서 그림 1의 毛細管을 反射方向으로 구부린 角  $\beta$ 로  $N'$ 번 反射시켰다고 하면 入射角  $i$ 는

$$i = \alpha + N\beta - N'\beta < 5^\circ \tag{2}$$

가 成立한다. 이 式에서  $N\beta - N'\beta = -\alpha$ 로 만들어 주면,  $i=0$  즉 X-선이 毛細管 軸을 따라서 나가는 경우 즉 視準化(collimated)된 경우를 얻게 된다.

그림 2의 경우는 X-선이 한쪽 面만을 따라서 反射 하면서 나가는 경우 이다. 이 때 光誘導管이 圓形으로 구부러져 있는데, 구부림 角  $\beta$ 가 있는데도 不拘하고, 入射角이 恒常  $\alpha$ (최초 入射角)와 같다는 特徵을 지니고 있다.

지름이  $10^2 \mu\text{m}$  정도인 레이저 플라즈마에서 發散하여 나오는 X-선을 平行光線으로 만들 때 分解能이 크게 向上되고, 그 利用이 넓어진다. 發散하는 X-선을 平行光

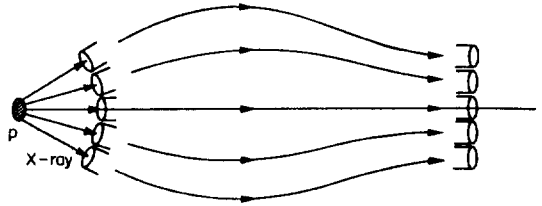


그림 3. X-ray Beam collimator. P: Laser plasma.

線으로 만드는데 (2)式을 이용 한다. 그림 2의 경우는 X-선을 視準化하는데는 쓸 수 없다.

$\alpha=0$ 인 경우를 생각하여 보자. (1)式에서  $N\beta < 5^\circ$ 이고,  $N=10$ 라 하면  $\beta=0.5^\circ$ 이다. 이 때 內徑이 0.5 mm의 毛細管을 쓴다면, 이 毛細管의 길이는

$$10 \times \left( 2 \times \frac{0.5 \text{ mm}}{\left( \frac{0.50^\circ}{60^\circ} \right)} \right) = 120 \text{ cm}$$

가 된다.

이어서 毛細管을 서로 反射方向으로 한번씩 구부리는 경우를 생각하여 보자. 이 때 (2)式에서

$$N\beta - N'\beta = N\beta - N'\beta = (N - N')\beta \quad \text{단, } \beta = \beta'$$

즉,  $N=N'$  또는 같은 길이의 毛細管을 써서  $i=0$ 으로 만들 수 있다(그림 3). 따라서 전체 毛細管 길이는 240 cm가 된다. 좀 길다는 印象을 주나, 크게 염려할 정도는 아니다.

### III. Type-2 X-선 Guide와 X-선 Collimator의 결합

그림 2의 X-선 Guide는 입의 위치까지 光源에서 나오는 X-선을 끌어 내는데 有用하다. 入射角  $\alpha$ 가 언제나 一定하다는 큰 利點을 이 light guide가 지니고 있다. 이 X-선 guide는 type-2 guide로 부르겠는데 이것을 그림 1의 Type-1 guide와 비교할 때, 内部反射方式이 다를 뿐만 아니라, capillary의 지름이 크다.

發散하는 X-선은 視準化 됨으로써 그 쓸모가 크게 向上 된다. 그래서 Type-2 X-선 guide로 그림 4의 한 點(A)로 끌어낸 X-선은 이어서 Type-1 X-선 guide에 의해 平行光線으로 變調될 수 있다.

그림 5에 tapered X-선 guide(Type-3)가 그려져 있다. 지름이  $d$ 인 毛細管의 口徑에 入射한 X-선이 작은 값의 지름을 가진 出力口徑에 다 모이고 있다. 이 때 入射하는

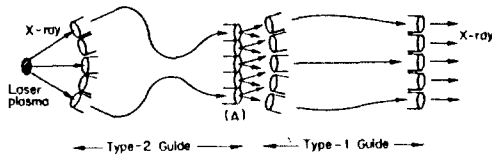


그림 4. Type-2 Guide와 Type-1 Guide의 結合.

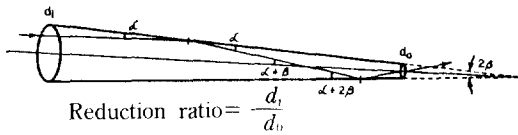


그림 5. Tapered guide (Type-3 guide).

X-선이 平行光線이라 할지라도 즉  $\alpha = \beta$ 라도, 出口口徑에서는 發散하게 된다. 따라서  $d_0$  다음에 Type-1 guide의 callimator를 結合해서 써야 한다. Tapered X-선 guide에 의해 入射角은  $\alpha + 2\beta \times N$  ( $N$ 번 反射)로 증가한다.  $\alpha + 2\beta \times N$ 은 물론  $5^\circ$ 를 넘을 수 없기 때문에 X-선 intensifier로서의 機能에는 制限이 있다. 可視光線이나 赤外線에서 쓰이는 tapered light guide에서  $\alpha + 2\beta \times N$ 가  $90^\circ$ 에 이르면, 光線은 뒤로 되돌아 가게 된다는 점에 유의 해야한다.

#### IV. Beam Homogenizer

그림 6에 毛細管 X-선 誘導管 다발의 出口面이 그려 있다. 毛細管의 管壁 살과 毛細管 사이의 틈  $S$ 가 그려 있다.  $S$ 에는 接着劑가 차있다. 살의 굵기  $t = (1/2)(d_2 - d_1)$ 와 틈  $S$ 가 있는 出力 X-선은 均一하지 않다. 이것을 均一한 波面  $W$  (Fig. 7)로 만드는 문제가 해결되어야 Kumakhov optics의 쓸모가 크게 擴張될 수 있다. 예로서,  $t$ 가  $5 \mu\text{m}$ 라 하면, 이미 生物學的 細胞의 構造를 밝히는 데는 문제가 생긴다. Lithography에서 흔히 쓰이는 criterion이 있는데 intensity로서 beam homogeneity가 80%가 되어야 한다는 것이다. 이 criterion을 만족시킬 수 있는 方法으로 素波動(wavelet)의 重疊(superposition)을 생각할 수 있다.

그림 7에서 波面  $W$ 는 각 毛細管에서 나오는 X-선의 素波面の 重疊을 나타내고 있다.  $W$ 의  $PQ$  領域에서 波面이 고른 세기를 가지려면 적절한 거리  $L$  만큼 素波動이 앞으로 나가야만 可能하고, 이 때  $L$ 값은 상당히 많은 數值計算을 해야 알아 낼 수 있을 것이다. 그러나 實驗

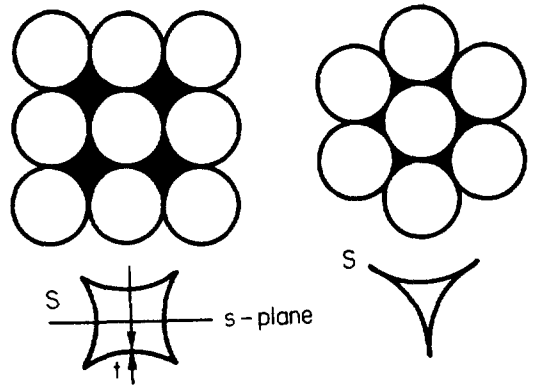


그림 6. 毛細管의 굵기  $t = \frac{1}{2}(d_2 - d_1)$ 과 毛細管들 사이의 틈  $S$ .

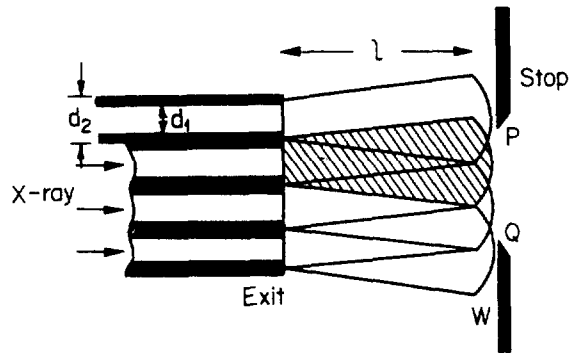


그림 7. Beam Homogenizer

的으로  $L$ 을 알아 내기는 어렵지 않을 것이다.  $W$ 에서  $PQ$ 를 規定하기 위해서, 적절한 stop를 쓸 필요가 있다.

#### V. 結 論

레이저 플라즈마 X-선의 이용을 크게 問題시킬 수 있는 Kumakhov optics 또는 capillary optics의 基本的인 方法을 소개하였다. 큰 角度를 이루고 發散하는 레이저 plasma X-선에 대해서 Kumakhov optics는 必須的이라고 말할 수 있다. Synchrotron 輻射의 guiding에도 쓸모가 있을 것이다.

Capillary 또는 中空섬유(hollow fiber)를 유리로서 뽑을 수 있다. 이 때 現在 이용되고 있는 光섬유뽑기 技術이 큰 도움이 될 것이다. 그러나 속이 비어 있는 유리섬유를 뽑는 데는 別途의 技術이 開發되어야 할 것이며, 이 때 中空플라스틱 섬유(脫濕 섬유) 製造技術이 또한 도움이

될 수 있다고 생각한다. Kumakhov optics로서 X-선의 guiding, collimation, intensification, beam homogenizing이 가능하게 되므로, X-선은 半導體 超微細加工, 醫療, 材料研究, X-선 microscopy 등에 마치 可視光線을 다루듯이 利用이 擴張될 것이다.

#### VI. 感謝의 글

이 論文을 쓰는데 貴重한 資料를 提供하여 준 New York 州立大(Albany) 物理學科의 金在水 教授에게 깊은 感謝의 뜻을 전하고자 한다. 또한 浦港工大 加速器研究所의 羅承裕 博士와의 討論에서 여러가지 새로운 着眼

點을 發見하였고, 또 科學技術院의 南昌熙 博士, 金炳允 博士와 有用한 對話를 가졌기에 여기에 感謝의 뜻을 적는다.

#### 參 考 文 獻

- [1] 金奎旭, 韓國科學技術院 博士學位論文 (1988).
- [2] 金東煥, 韓國科學技術院 博士學位論文 (1990).
- [3] Walter M. Gibson, the Center the X-ray Optics, the University at Albany, Albany, N.Y., U.S.A.
- [4] Muridan A. Kumakhov, the Institute for Roentgen Optical System, the World Laboratory, Moscow, CIS (蘇聯).