

영국 RAL 연구소에서의 레이저플라즈마 X-선 리소그래피 연구 Review on Laser-Plasma X-Ray Lithography at RAL in UK

김남성, I.C.E.Turcu*, I.N.Ross*, C.M.Reeves*, C.M.Mann*, B.J.Maddison*, R.Allott*, A.M.Gundlach*,
P.Prewett*, S.E.Huq*, B.Cook*, P.Mitchell*, N.Lisi*, P.Anastase*, J.T.M.Stevenson**, 문성욱***
삼성전자 Optic Lab, *Rutherford Appleton Lab(RAL), **Univ. of Edinburgh, ***한국과학기술연구원
E-mail: knskim@telecom.samsung.co.kr

At Rutherford Appleton Laboratory(RAL), a high-repetition rate ps excimer laser-plasma x-ray source has been developed for x-ray lithography with a calibrated output of up to 1 watt X-ray average power at 1 nm wavelength. In a previous reports^{1),2)} this compact x-ray source was used to print 0.18 μm lines for a gate on Si-FET devices and deep three-dimensional structure with 100 μm length, 25 μm width, and 48 μm depth for a nanotechnology. The deep x-ray lithography is called as LIGA technology and getting a wide interest as a new technology for a nano-device. In this report all this works are summarized.

1980년대 후반에 러더포드-애플턴 연구소(Rutherford Appleton Laboratory; RAL)의 레이저플라즈마 X-선 연구실(Laser-Plasma X-ray Lab; LPXL)에서 Dye Laser/KrF 엑시머증폭기 개발을 완료한 후에 1990년대초에 Nd:YAG Laser-Dye Laser-KrF Excimer Amplifier의 체인으로 증폭되는 고효율 KrF 엑시머레이저 개발, 고체표적에 집속하여 레이저플라즈마 발생, 이로부터 방출되는 연 X-선의 응용 연구를 지속적으로 수행하여 왔다¹⁾⁻⁵⁾. 이 결과 X-선 리소그래피(X-ray lithography)를 포함하여 X-선 현미경(X-ray microscopy), 방사성 생물학(Radiobiology) 등의 분야에서 많은 학회발표와 논문발표가 이루어졌다. 이 중에서 X-선 리소그래피는 1G-DRAM 급 이상의 초고집적 반도체 제작에 사용될수 있는 기술로써 주목을 받고 있으며, W. Ehrfeld 와 D. Munchmeyer⁶⁾에 의해서 1986년에 처음으로 발표된 LIGA 기술의 구현방법으로도 각광을 받고 있는데 LPXL연구실에서도 1996년 이후에 여러편의 논문이 발표된 바 있다^{2),7)}. 특히 X-선 리소그래피는 X-선을 노광용 광원으로 사용하여 마스크를 통하여 레지스트에 원하는 패턴을 복사하는 기술인데, LPXR 연구실에서는 이를 이용하여 180 nm 의 미세패턴을 실리콘기판 위에 제작하였으며 처음으로 200 nm 의 최소선폭을 가지는 FET(Field Effect Transistor)를 제작하였다^{1),8)}. 본 논문에서는 연구에 사용된 KrF 레이저 시스템과 타겟챔버 시스템에 대해서 간략하게 소개하고, 레이저플라즈마의 발생 및 X-선방출과 X-선 리소그래피와 LIGA 기술은 논문발표시 소개하고자 한다.

KrF 레이저 시스템은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 82 MHz의 주파수로 모드-록킹된 Nd:YAG 레이저로부터의 출력을 제2고조파로 변환시켜 색소레이저(Pyridine-2 dye, Spectra Physics 375)를 동기화펌핑시킨다. 이때 발생하는 출력의 펄스당 에너지는 약 1 nJ, 펄스폭은 5 ps, 동작파장은 746 nm이다. 이 출력이 XeF 엑시머레이저로 펌핑되는 2단계의 Dye(Pyridine-2 dye, Rhodamine-700) 증폭기를 거쳐서 증폭되어 300 μJ 까지 증폭된다. 그 다음에 2개의 7 mm 두께 BBO결정을 사용하여 제2고조파(373 nm), 제3고조파(248.6 nm)로 변환되며 총 변환효율은 8% 정도가 되었다. 여기까지가 공진기이고 10-20 μJ , 248 nm, 7 ps의 출력이 얻어졌다. 이때 얻어지는 단일펄스는 Temporal/Spatial Multiplexer(또는 pulse stacker)로 부르는 4개의 50:50 빔분할기(beam splitter)에 의해서 1.86 ns의 펄스간격을 가지는 16개의 펄스로 나누어진 후에 2단계의 KrF 엑시머증폭기(Questek KrF 2440, Lambda 210 FI)로 진행하여 증폭된다. 이때 16개의 펄스열은 약 13 ns의 전체 펄스폭을 가지며, 이 시간폭은 KrF 엑시머레이저의 출력 시간폭인 20 ns 속에 충분히 자리하게 되므로 좋은 증폭율을 가질수 있다. 최종적으로 얻어진 레이저빔의 공간적 크기는 2.3 cm X 1.2 cm가 되었고 최대 에너지는 pulse-train당 370 mJ까지 얻을 수 있었다.

자(A)의 진폭이 1 보다 매우 작고 격자 파 벡터 방향으로 매질을 이동시킬 때 격자변위 x 의 함수로서 강도합($I_1 + I_2$)과 강도차($I_1 - I_2$)는 다음과 같다[2].

$$I_+(x) = I_t e^{-\frac{\alpha d}{\cos \theta}} \left[1 - 2A \cos\left(\phi_A + \frac{2\pi}{\Lambda} vt\right) \right] \quad (2a)$$

$$I_-(x) = I_t e^{-\frac{\alpha d}{\cos \theta}} \left[0 - 2P \sin\left(\phi_P + \frac{2\pi}{\Lambda} vt\right) \right] \quad (2b)$$

여기서 Λ 는 격자주기이며 $I_t = I_1(0) + I_2(0)$ 다. $I_+(x)$ 와 $I_-(x)$ 는 상대적인 진폭 $2A$ 와 $2P$ 를 가지고 위상변이 ϕ_A 와 ϕ_P 로 진동할 것이다. 격자 이동 x 의 함수로서 $I_+(x)$ 와 $I_-(x)$ 의 값은 위상변이 ϕ_A 와 ϕ_P 뿐만 아니라 위상과 흡수격자의 진폭 Δn 과 $\Delta \alpha$ 를 결정할 수 있다.

3. 실험 및 결과

홀로그래프 격자의 진폭과 위상변이를 측정하기 위해 제안된 몇 가지 방법들은 격자 파 벡터 (grating wave vector)의 이동에 기초하거나 입사빔의 위상을 조절하여 간섭무늬를 이동시키거나 외부전기장을 가하는방법 등이 있다. 본 연구에서는 흡수격자와 위상 격자의 진폭을 결정하고 강도간섭무늬에 대해 위상차를 측정하는 방법으로 격자 파 벡터를 이동시키는 방법을 이용하였다. 이 방법은 간편하고 선형 모터(linear motor)만 있으면 측정이 가능하다. 이 방법은 이광과 혼합 실험을 기초로 하고 있으며, 매질을 통과하는 두 빔의 강도를 간섭무늬 위치의 함수로써 측정한다.

그림1은 실험 장치도이다. 두 입사하는 빔의 강도간섭무늬가 필름 표면에 표현되고 있고, 매질 내부에는 이 강도간섭무늬에 대해 위상변이를 가지는 위상(흡수)격자가 만들어진다. 적당한 노출에너지를 받은 후 홀로그래프를 격자 파 벡터 방향으로 선형모터를 이용해서 이동시킨다. 그러면 포토다이오드에서 측정되는 광파의 세기는 간섭무늬 위치의 함수로서 주어진다.

그림2는 포토폴리머를 임의의 시간동안 기록한 후 격자 파 벡터방향으로 선형모터를 이용하여 일정속도로 이동시켰을 때 나타나는 두 빔의 합(sum)과 차(difference)에 대한 데이터와 이론곡선을 나타내고 있다. 식(2)를 이용하여 실험 데이터와의 fitting에 의하여 $\phi_A = 11^\circ$, $\phi_P = 83^\circ$, $\alpha_1 = 18.8 \text{ cm}^{-1}$, $n_1 = 1.1 \times 10^{-3}$ 의 값들을 얻었다.

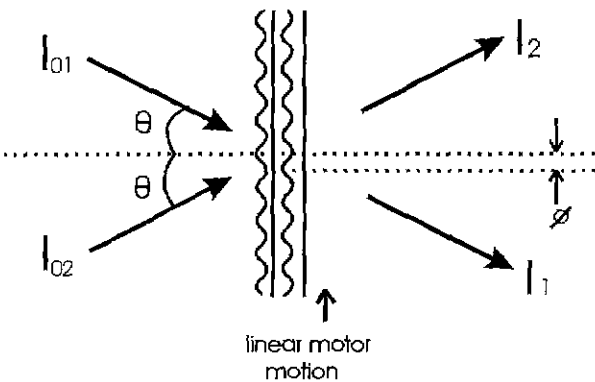


그림 1. 실험 장치도.

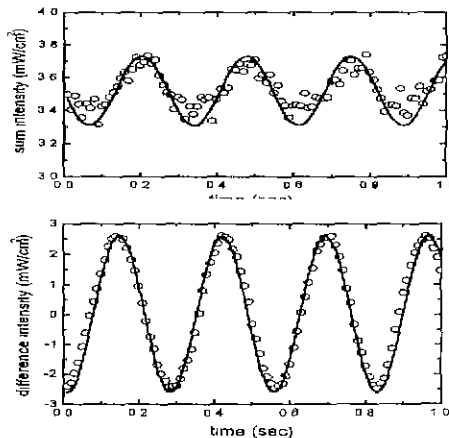


그림 2. 실험 데이터

[1]. C. H. Kwak, S. Y. Park, H. K. Lee and E.-H. Lee, Opt. Commun. **79**, 349 (1990).
 [2]. C. A. Walsh and W. E. Moerner, J. Opt. Soc. Am. **B9**, 1642 (1992).