위상변조마스크를 이용한 펨토초 펄스 재단 방법 소개

Femtosecond Pulse-Tailoring Technique using Phase-Converted Mask

김지희*, 한강전, 장동욱, 김남제, 이기주

충남대학교

tomo@cnu.ac.kr

빠른 속도의 광통신이나 계산 시스템을 다루기 위해서는 극도로 빠른 반복율의 피코초나 펨토초 펄스가 필요했기 때문에 최근, 모드 잠금(mode-locking)이나 직접 변조(direct modulation)방법에 통해 얻는 것을 넘어서, 펄스 반복률이 뛰어난 광학적 펄스 열(optical pulse train)을 발생시키는 여러 가지 방법이 개발되었다.

그 중 높은 분해능의 펨토초 펄스 재단법은 시간적으로 분산이 없는 회절격자 장치에서 스펙트럼을 여과하여(spectral filtering) 임의의 모양을 갖는 펨토초 펄스를 재단할 수 있게 만든다. 스펙트럼 여과(spectral filtering)는 공간적으로 패턴이 있는 마스크를 사용하면 가능하고, 이 때 쓰이는 마스크는 공간적으로 분산된 광학적 주파수 성분의 진폭(amplitude)과 위상(phase)을 변화시키는 역할을 한다. 진폭을 조절해 펄스열을 만드는 방법(amplitude filtering)은 분산된 주파수 성분을 공간적으로 차단시켜서 펄스열을 얻는다. 따라서 들어가는 펄스보다 효율이 떨어진다. 반면에 위상변환마스크(phase mask)는 주파수 성분들의 위상만을 조절하기 때문에 진폭의 변화도 없고 손실도 없이 펄스를 재단할 수 있게 된다. 주파수 도메인의 스펙트럼을 푸리에 변환하면 시간 도메인에서의 펄스를 알 수 있고, 주파수 도메인의 스펙트럼에, 임의의 위상함수를 주게 되면, 펄스의 재단이 가능해진다[(1)].

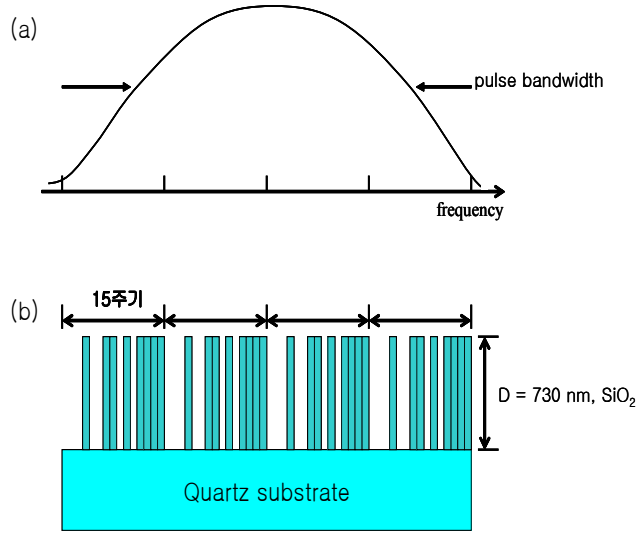

그림 1. 위상마스크를 이용하여 THz의 반복률을 갖는 펄스열 형성: (a) 입사시킨 스펙트럼, (b) 제작한 위상필터의 모식도

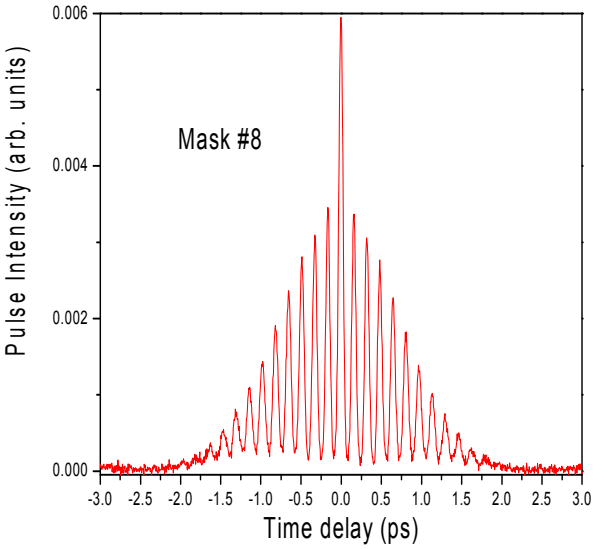

그림 2. 펄스재단방법에 의해 만들어진 펄스열 실험데이터. 6.45 THz의 반복률.

위상함수로 M-수열(maximal length-sequence)을 택하였고[2] 패턴의 선폭을 조절하면 원하는 반복율의 펄스열을 만들 수 있다. M-수열은 {000100110101111}과 {1001011011110101000100111000001}로써 0과 1의 조합으로 이루어져 있는데, 그림 1(b)와 같이 15주기와 31주기를 한 주기로 여러 번 반복시킨 형태로, quartz 기판 위에 SiO_2를 얻고 microlithography를 통해 패턴을 제작하였다. 그림 1(a)와 같은 bandwidth를 갖는 펄스가 이 M-sequence pattern를 지나게 되면 그림 2와 같은 펄스모양의 변형이 생기게 된다. 본 연구에서는 위상차를 $\Delta\phi = 0.84\pi$ 만큼 주었는데, 이유는 결과물로 나오는 펄스열이 $\int E(\omega)d\omega$ 에 의해 결정되고, 위상차를 $\Delta\phi = \pi$ 로 했을 경우 펄스열의 중심($t = 0$)에 있는 펄스가 없어지기 때문이다. 결정된 위상차($\Delta\phi$)는 패턴의 두께(D : depth)와 상관관계에 있기 때문에 SiO_2의 굴절률(n)과 사용되는 중심파장(λ)을 다음 식에 대입하면 그 두께를 구할 수 있는데, 구해진 SiO_2의 두께는 $\simeq 0.73\,\mu m$ 이다.

$$\Delta\phi = \frac{2\pi(n-1)D}{\lambda}$$

또한 위상마스크는 input bandwidth가 통과할 수 있을 만큼의 너비와 길이를 고려하여 제작하였고, 필터에 의해 생긴 펄스열은 필터를 통과하기 전의 단일 펄스폭만큼 짧게 유지시켜주었다.

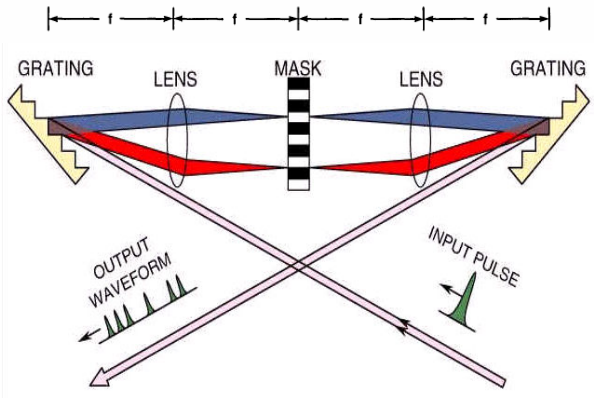

그림 3. 펄스 재단 실험 방법의 모식도

그림 3에서 보는 바와 같이, 830 line/mm 인두 쌍의 회절격자와 렌즈, 그리고 제작한 마스크를 $f = 15\,cm$ 의 간격으로 설치하고[3], 이를 통과한 단일 펄스는 그림 2와 같이 테라헤르츠의 반복률을 갖는 펄스열로 재단되어 나오는데, 그림 2는 제작한 마스크 중 8번을 사용하였고, 반복률은 6.45 THz로 확인하였다. 마스크 패턴의 너비를 조절하면 원하는 반복률을 갖는 펄스열을 만들 수 있다. 본 연구에서는 70 fs의 펄스폭과 30 nm의 반치폭을 갖는 펨토초 Ti:sapphire laser의 중심파장을 780 nm, 800 nm, 830 nm로 변화 시켜 가며 실험하였고, 우리는 이를 통해 약 2 THz-11 THz에 걸친 펄스열을 확인할 수 있었다. 또한, 우리는 현재, 분산된 빔의 파장이 갖게 되는 마스크 상의 위치와 각 파장과 마스크 패턴 너비, 둘 사이의 상관관계에 관한 연구를 더 진행하여, 좀 더 높은 분해능을 갖는 테라헤르츠 반복율의 펄스열을 만들기 위한 연구를 진행 중에 있다.

참고문헌

1. A. M. Weiner *et al.* "Generation of terahertz-rate trains of femtosecond pulses by phase-only filtering", Opt. Lett. 15, 51-53 (1990)
2. M. R. Schroeder, Number Theory in Science and Communication (Springer-Verlag, Berlin, 1996)
3. A. M. Weiner *et al.* "High-resolution femtosecond pulse shaping", J. Opt. Soc. Am. B 5, 1563-1572 (1988)