

양자 암호화키 분배 시스템의 위상변조기 설계

Design of Phase Modulator for Quantum Cryptographic Key Distribution System

김인수*, 김요희*, V. E. Strigalev**

*한국전기연구원 정보-광응용연구그룹, **SUT
iskim@keri.re.kr

1. 서 론

양자 암호화 키 분배 시스템에서 광자를 code화시키는 방법은 크게 편광coding과 위상 coding으로 대별할 수 있다. 또한 프로토콜은 4개의 상태를 가진 BB82 프로토콜과 2개의 상태를 가진 B92 프로토콜을 사용한 시스템을 많이 연구하고 있다. 본 연구는 B92프로토콜을 적용한, 위상 coding 양자 암호화 키 분배 시스템의 구성에 필요한 위상 변조기에 대한 비교 검토 및 위상 변조기 설계에 관한 것이다.

2. 위상 변조기의 설계

2.1 압전세라믹 변조기

이것은 압전세라믹의 스플에 광섬유를 감은 형태의 변조기이다. 전압 $\sim V$ 가 스플의 양쪽 측면에 공급되면, 스플의 바깥쪽 둘레가 변하게 된다. 이 변화는 광섬유의 길이 변화 Δl 을 일으킨다. 광섬유에서의 위상변조 $\Delta \phi$ 는 $\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (n\Delta l + \Delta n)$, 여기서 Δn 은 광탄성 때문에 생기는 굴절율의 변화이다. 석영 광섬유에서는 $\Delta \phi \approx 0.78 \cdot (\frac{2\pi}{\lambda})n\Delta l$ 이 된다. 이 변조기의 효율 η 는 공급되는 전압 V 와 위상천이가 2π 가 되게 스플에 감은 광섬유의 턴수 N (이것은 적을수록 좋다)의 곱으로 된다. 즉, $\eta = (V \times N)$ 이다. PZT-5H라는 압전세라믹의 저주파수(공진주파수보다 낮은 주파수)에서의 효율 η 이 약 60 - 100 정도 되었다. PZT-5H의 높이 변화에 대한 계수가 약 140kHz · cm, 두께의 변조에서는 200kHz · cm 의 계수를 얻었다. 이 실린더의 파라미터의 변경은 동작주파수의 범위를 DC에서부터 수백 kHz까지 가능하게 한다. 그러나 정현파와 다른 신호로 변조시킨다면, 아주 낮은 주파수 범위(1kHz보다 낮은)를 제외하고는 동작시키기가 어렵다. QKD scheme 에서는 구형의 PRS 변조가 사용된다. 그림2에서처럼 cosine과 비슷한 펄스 형태의 펄스변조가 가능하다. 이 경우 변조기의 응답 시간은 $L \times n/c$ 보다 빨라야 한다. 실제 사용시 이 소자의 문제점은 기생 편광 변조이다. 이것은 스플에 감긴 광섬유의 만곡 때문에 생기는 것으로 패러데이 거울(FM)을 사용한 구조에서만 이 문제점을 극복할 수 있다.

2.2 전기광학적 변조기

전기광학(EO: Electro optic) 위상변조를 위해 이용하는 주요 효과는 Pockels의 이름을 딴 선형 전기-광학적 효과(EOE: Electro Optical Effect)이다. 이것은 2차 전기광학효과(quadratic EOE)보다 강력한 것으로 이방성 크리스탈에서만 일어난다. LiNbO₃ 는 r_{ij} 가 크기 때문에 전기광학적 변조기의 재료로 널리 사용된다. 이 크리스탈에 대해 n 타원면의 방정식을 적어보면,

$$\text{만약 } E_x \text{를 적용하면, } E_y = E_z = 0, \frac{x^2}{n_o^2} + \frac{y^2}{n_o^2} + \frac{z^2}{n_e^2} + 2xz \cdot r_{51} \cdot E_x + 2xy \cdot r_{61} \cdot E_x = 1,$$

$$\text{만약 } E_y \text{를 적용하면, } E_x = E_z = 0, x^2(\frac{1}{n_o^2} + r_{12} \cdot E_y) + y^2(\frac{1}{n_o^2} + r_{22} \cdot E_y) + \frac{z^2}{n_e^2} + 2yz \cdot r_{42} \cdot E_y = 1$$

$$\text{만약 } E_z \text{를 적용하면, } E_x = E_y = 0, x^2(\frac{1}{n_o^2} + r_{13} \cdot E_z) + y^2(\frac{1}{n_o^2} + r_{23} \cdot E_z) + z^2(\frac{1}{n_e^2} + r_{33} \cdot E_z) = 1$$

마지막 경우 크리스탈은 단일축으로 남고, 정상광선에서는 $\Delta n_x = \Delta n_y = -\frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z$ 이고, 이상 광선

에서는 $\Delta n_z = -\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z$ 이된다. 만약 빛이 Z축을 따라 진행하면 (종축 전기광학 효과, longitudinal EO effect), 복굴절은 없다. 그러나 인가하는 전압이 상당히 높아야 한다. 그리고 만약 빛이 Y축을 따라 진행하면 (교축 전기광학 효과, transverse EO effect), 복굴절이 일어난다. Z편광에 대해 유도된 위상천이 $\Delta \phi$ 는, $\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot (-\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} E_z) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot (-\frac{1}{2} n_e^3 r_{33} \frac{V}{d})$ 이고, X편광에 대한 위상천이 $\Delta \phi$ 는, $\Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot (-\frac{1}{2} n_o^3 r_{13} E_z) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot L \cdot (-\frac{1}{2} n_o^3 r_{13} \frac{V}{d})$ 이다. 여기서 d는 크리스탈의 두께이다. 따라서 $\Delta \phi$ 에 대해 높은 편광 의존도를 가진다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 변조기를 두 개의 소자로 구성하면 된다(그림3). 그림3과 같이 2개의 소자로 구성된 변조기에서의 위상천이 $\Delta \phi$ 는, $\Delta \phi = \frac{\pi}{\lambda} \cdot L \cdot (n_e + n_o) + \frac{\pi}{2\lambda} \cdot L \cdot (n_o^3 r_{13} + n_e^3 r_{33}) \cdot \frac{V}{d}$ 이 되며, 편광상태에 독립적이다. 본 연구에서는 패러데이 회전자와 거울로 구성된 패러데이 거울(FM)을 부착하여, 광섬유에서 발생된 어떠한 복굴절 현상도 보상되도록 하여, 편광변화에 독립적이며, 간섭계 구성 소자의 역할을 할 뿐만 아니라 변조기와 같은 하우징에 들어가도록 설계하였다(그림4,5). 이 구조는 빛의 전파가 왕복하여 구동전압이 이전의 구조에 비해 반으로 줄어들고, 또한 패러데이 거울의 패러데이 회전자에 의해 편광 의존 정도도 많이 줄었다. 구동 전압 V를 낮추기 위해 L/d 비를 증가할 필요가 있다. 그러나 문제는 빛의 회절이다. 가장 좋은 방법은 공초점의 빔으로 회절을 제한하는 것이다. 여기서 $2\omega_0$ 는 변조기의 중심에서의 빔의 직경이며, 가장자리에서의 빔의 직경은 $2\sqrt{2} \cdot \omega_0$ 가 된다. 이 구조를 가지고 광섬유 간섭계에 사용할려면 다음과 같은 요구사항들을 고려하여 설계, 구성하여야 한다.

1. 광섬유와 크리스탈사이에서의 광이 들어오거나 나갈 때 발생하는 커플링 손실이 작아야 한다.
2. 모든 광학소자에서의 역반사광이 작아야 한다. 이것을 고려하여 설계한 구조를 그림5에 나타내었다.

3. 결론

위상변조기로 2가지 형태의 소자를 검토하였다. Bob측과 Alice측에 사용되는 위상변조기의 기술적 사양이 약간 다르다. Alice측의 변조기의 시간응답이 Bob의 변조기보다는 더 빨라야 한다. Alice측의 변조기는 F 펄스와 S 펄스가 앞선 변조기를 동작하는 사이의 시간 τ 동안에 위상을 변경시켜야 한다. 이 시간은 지연 선로의 길이 L에 따라 달라진다. 이 지연 선로의 길이는 커플러1과 FM1사이의 길이와 커플러1과 FM2사이의 길이의 합과 같다(본 학술회의의 시스템 구성 설계에 관한 논문 참조). $\tau_A = 2 \times L/\nu$ 이다. 여기서 ν 는 광섬유에서의 빛의 속도. 만약 L=50m 이면, $\tau_A = 0.1\mu s$ 가 된다. 그러나 Bob의 변조기는 시간 τ_B 동안 위상을 바꾸면 된다. 이 시간은 Bob으로부터 Alice와 Alice에서 Bob으로 되돌아오는 왕복전파시간이다. 만약 Alice와 Bob 사이의 거리가 1km 라면, τ_B 는 약 $10\mu s$ 정도 된다. 이것은 τ_A 보다 100배나 긴 시간이다. 따라서 우리는 Bob의 위상변조기로 좀 더 값싼 소자인 압전세라믹(piezoceramic) 변조기를 사용할 수 있다는 것도 확인할 수 있었다.

본 연구는 과학기술부의 국제공동연구개발사업의 지원으로 수행되었음[M1-0105-00-0050].



그림1. 압전세라믹 변조기

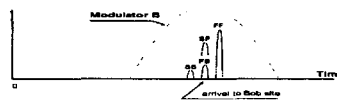


그림2. 변조신호와 광펄스

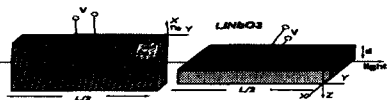


그림3. 두 소자로 구성된 변조기

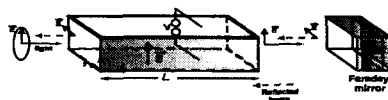


그림4. 위상변조기와 FM

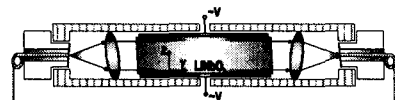


그림5. 설계한 변조기의구조