

**양자 궤적 이론에 의한 광매개 하향 변환 분석 및
양자 암호에서의 응용**

**Quantum Trajectory Theory of Parametric Down
Conversion and Application to Quantum Cryptography**

장윤식, 김기식, 노재우

인하대학교 물리학과

g1983678@inhavision.inha.ac.kr

본 논문에서는 제2종 위상 정합을 이용한 광매개 하향 변환에서 방출되는 광자쌍을 이용한 양자 암호의 구현을 양자 궤적 이론을 통하여 전산 시뮬레이션 및 분석하였다. 제2종 위상 정합을 이용한 광매개 하향 변환에 의해 발생한 양자얽힘 상태에 있는 빛을 발신자와 수신자가 나누어 받은 후, 발신자가 편광 선택에 의한 측정을 하면 양자암호키가 생성된다. 이와 동시에 수신자 측의 빛도 환원되어 정보가 순간적으로 전달된다. 물론 순수상태인 경우 완전히 정보가 전달되지만, 주위 환경의 효과 때문에 어느 정도의 손실이 존재한다. 그래서, 고전적인 채널을 통해 편광방식과 동시 측정을 확인하여 일치된 것들만 양자암호키로 사용한다. 이 경우 비국소적 상관관계가 존재하므로, 벨의 부등식과 유사한 부등식을 이용하여 양자채널의 신뢰도와 도청여부를 확인할 수 있다.

이러한 암호키의 전달은 양자얽힘 상태의 생성이 전제되어야 하고, 이것을 master equation을 통해 기술하였다.

$$\frac{d\rho}{dt} = -i\omega[a_s^\dagger a_s, \rho] - i\omega[a_i^\dagger a_i, \rho] + [\chi(E_0 e^{-i2\omega t} a_s^\dagger a_i^\dagger - E_0^* e^{i2\omega t} a_s a_i), \rho] + \sum_j (L_j \rho) + \sum_j (M_j \rho)$$

$$L_j \rho = \gamma_j (2a_j \rho a_j^\dagger - a_j^\dagger a_j \rho - \rho a_j^\dagger a_j) + 2\gamma_j \bar{n} (a_j \rho a_j^\dagger + a_j^\dagger \rho a_j - a_j^\dagger a_j \rho - \rho a_j^\dagger a_j)$$

$$M_j \rho = \kappa_j (2a_j \rho a_j^\dagger - a_j^\dagger a_j \rho - \rho a_j^\dagger a_j)$$

이 방정식은 외부 환경에 노출된 비선형 결정에 강한 결맞음 빛을 쬐어 양자얽힘 상태에 있는 광자의 생성 및 측정을 기술한다. $L_j \rho$ 는 외부 환경에 의한 손실 및 잡음의 효과를 기술한다. 광자가 측정되는 것을 진공인 열 저장체에 광자가 흡수되는 과정으로 기술할 수 있으므로, $M_j \rho$ 를 통해 그것을 나타내었다.

그림1은 광매개 하향 변환에 의한 빛 중에서 편광 얽힘이 있는 모드의 빛만을 선택하기 위한 구성이다. 구멍에서 나오는 빛은 signal field의 모드와 idler field의 모드가 중첩되어 있다. 두 광자는 동시에 방출된 것이고, 한쪽이 측정되면 다른쪽은 반대편 모드로 방출되기에, 수직편광과 수평편광에 대해서 얽힘상태에 있게 된다. 이 두 모드의 상태는 다음과 같이 쓰여진다.

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|V\rangle_1 |H\rangle_2 + e^{i\theta} |H\rangle_1 |V\rangle_2]$$

그림2는 이렇게 방출된 빛을 편광 빔살 가르개를 이용하여 측정하는 것이다. 편광 빔살 가르개는 각도를 변화시켜가며 빛을 가르도록 구성한다. 이것은 비직교 상태를 이용한 양자 암호화를 위한 구성이다.

다. 빛살 가르개의 각도에 따라서 각 편광 모드의 반사율과 투과율이 달라지게 된다.

이렇게 측정되는 상황은 양자 궤적 이론에 의해서 다루어질 수 있다. 양자 궤적 이론은 master equation에 의한 time evolution을 배타적 확률에 의한 몬테카를로 시뮬내기를 통해 분해하는 것이다. 즉, 전체의 time evolution을 reservoir에 의한 양자적 환원을 하는 각각의 ensemble member로 분해한다. 그림2에서의 각 측정기에 의한 빛의 측정을 collapse operator로 하여 전산 시뮬내기를 하였고, 그에 의해 제2종 위상 정합을 이용한 광매개 하향 변환에 의한 양자 암호화에서 주위 환경에 의한 효과와 도청에 의한 신뢰도를 분석하였다.

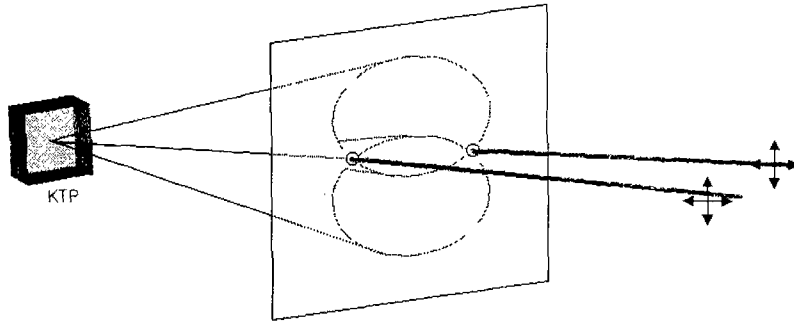


그림1. 편광 얽힘 상태에 있는 모드의 추출

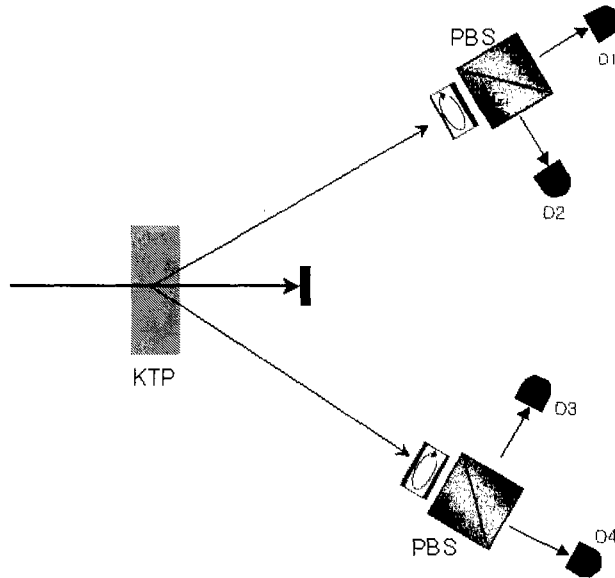


그림2. 편광 얽힘에 의한 양자 암호키 전달

참고 문헌

- [1] D. Bouwmeester, A. Ekert, and A. Zeilinger, *The Physics of Quantum Information*, (Springer-Verlag, Berlin, 2000)
- [2] H. J. Carmichael, *An Open Systems Approach to Quantum Optics*, Lecture Notes in Physics, Vol. m18 (Springer-Verlag, Berlin, 1993)

