

---

# 합주파에 의한 청색레이저 발생

이영우\*

## Blue Laser Generated by Sum Frequency

Young-Woo Lee\*

### 요 약

809nm의 고출력 반도체 레이저(500mW)의 출력광과 LD(Laser Diode) 여기 Nd:YVO4 레이저의 파장 1064nm를 공진기 내부에서 비선형 광학 소자 KTP(Potassium titanyl phosphate : KTiPO4)를 사용하여 합주파 발생 파장인 459nm의 청색레이저를 얻었다. 제2의 위상 정합 정합조건( $\psi = 90^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ )에서 반도체 레이저의 입력광 세기가 400mW일 때 청색레이저의 최대 출력 0.95mW를 얻었으며, 청색레이저의 발진문턱입력 세기는 120mW이었다.

### ABSTRACT

We have obtained 459nm blue laser radiation generated by intracavity sum frequency generation(SFG) due to the mixing of the 1064 nm laser output of a Nd:YVO4 pumped by diode and the 809nm radiation from high-power semiconductor laser(500mW). The maximum blue output power of 0.95 mW was obtained using 400 mW input power of semiconductor laser at the type II phase matching condition ( $\psi = 90^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ ). The threshold input power of blue laser generation was 120 mW.

### 키워드

SFG, Blue Laser, KTP, Nd:YVO<sub>4</sub>, Solid-state laser

## I. 서 론

최근 고출력 반도체 레이저와 고체 레이저 매질의 결정 성장 기술의 발전은 반도체 레이저를 여기 광원으로 하는 고체 레이저 기술의 괄목할 만한 성장을 갖고 왔다. 광 디스크 기록 밀도의 향상 및 레이저 프린터의 인자 해상도 향상 등의 응용면에서 레이저 장치의 소형화와 레이저 광원의 단파장화가 매우 중요한 기술로 주목받기 시작했다. 소형화에 있어서는 최근 반도체레이저의 고출력화와 함께 이를 고체 레이저의 여기원으로 사용함으로써 장치의 소형화가 가능하게 되었다. 가장 바람직한 장치의 형태는 반도체 레이저에서 직접 짧은 파장의 레이저를 실

현하는 것이나 현재 실온의 조건하에서 청색의 발진 파장으로 장시간 안정되게 동작하는 반도체 레이저는 안정도 및 수명 측면에서 여러 가지 기술적한계가 있다.

현재까지 보고된 청색 레이저의 실현 방법은 크게 세 가지로서 첫 번째로 반도체 재료로부터 직접 청색 레이저를 얻는 방법[1], 두 번째로 반도체 레이저의 파장을 직접 1/2로 변환하는 도파로 QPM(Quasi Phase Match) 제 2 고조파 방식[2], 세 번째로 반도체 레이저 다이오드 여기 Nd:YAG 레이저의 출력을 비선형 소자인 KTP를 이용하여 얻는 방법등이 있다[3,4]. 청색 반도체 레이저의 경우 아직 실용성과 신뢰성의 문제가 있고 도파로 방법은 위상 정합조건을 허용하는 기본파의 파장 대역폭이 매우 작아

실용화에 어려움이 있다. 한편 고체 레이저의 1/2파장을 KTP를 이용하여 직접 얻는 방법은 실용화되어 매우 좋은 방법이기도 하지만 하나 KTP의 SHG에 대한 위상 정합 조건을 만족하는 파장이 500nm 정도로 제한되므로 그 이하의 단파장화가 어렵다. 본 연구에서는 KTP로부터 반도체 레이저 여기 Nd:YVO4 레이저와 고출력 반도체 레이저와의 합주파(Sum Frequency)를 발생시켜 459nm의 청색 레이저를 얻는 방법으로 고효율의 안정된 청색 레이저를 실현할 수 있다.

### II. 비선형 결정에 의한 합주파 발생 이론

비선형 광학 결정에 전장 E가 가해지면, 분극 P가 발생된다.

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \dots \quad (1)$$

$\epsilon_0$ : 진공의 유전율

$\chi$ : 비선형 감수율(결정의 고유정수값)

제 2 고조파 (SHG : Second Harmonic Generation)와 합주파 발생(SFG : Sum Frequency Generations) 등에서는 비선형 광학 정수,  $d_{ij} = \chi_{ij}^{(2)}/2$ 를 사용한다. 전장 E가 각 주파수  $\omega_1, \omega_2$ 을 갖는 두 개의 레이저 광으로 이루어진다면,

$$E = E_1 \exp(i\omega_1 t) + E_2 \exp(i\omega_2 t) \quad (2)$$

(1)식을 (2)식에 대입하면,

$$P(2nd) = \epsilon_0 \chi_2 [E_1^2 \exp(i2\omega_1 t) + E_2^2 \exp(i2\omega_2 t) + 2E_1 E_2 \exp(i(\omega_1 + \omega_2)t)] \quad (3)$$

과 같이되고 제 2 고조파 성분인  $2\omega_1$  및  $2\omega_2$ 의 항 이외에 합주파 성분의 항,  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 가 나타난다. 이와 같이 새롭게 생성된 분극 성분에 의한 전장에 의해 합주파광이 생성(Sum Frequency Generation) 된다. 이때,  $k_1$ 을 전파상수로 한다면,

$$k_i = k_1 + k_2 \quad (4)$$

가 성립되는 방향으로 합주파가 발생하게 된다. (4)식이 합주파 발생의 정합조건으로 각 파장의 굴절율을  $n_i$ 로 표현하면 (4)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n_3 \omega_3 = n_1 \omega_1 + n_2 \omega_2 \quad (5)$$

각각의 파장 혹은 각주파수에 대한 굴절율 분산은 (5)식을 만족시킬 수 있는 비선형 결정에의 입사각도를 계산하는 것이 가능하다.

(5)식을 만족하는 방향은 기본파의 편광 방향에 의해 두가지 형태가 존재한다. 두개의 기본파 편광 방향이 같은 경우를 제 1종 위상 정합조건, 다른 경우를 제 2종 위상 정합 조건이라고 한다. 위상 정합 조건을 만족하는 비선형 결정의 방향이 정해지면, 파장 변환 효율을 결정하는 실험적 비선형 광학 정수를 구할 수 있다. 비선형 광학 정수는 3차원적 tensor의 성분 형태로 표현된다. 위상 정합 조건에서 최대의 실험적 비선형 광학 정수값을 주는 비선형 결정의 방위를 구할 수 있다.

### III. 반도체레이저 여기 Nd:YVO4레이저의 합주파 발생

459nm의 청색 합주파 발생의 위상 정합 조건인 Non-Critical Phase Matching 조건에서 809nm의 반도체 레이저를 기본파로 설정하고 레이저 다이오드 여기 Nd:YVO4 레이저의 1064nm와의 합주파 발생 실험 장치도를 그림 1에 보인다. 발전 실험에 사용된 직경 3mm×길이 3mm의 Nd:YVO4 결정은 500mW의 고출력 레이저 다이오드

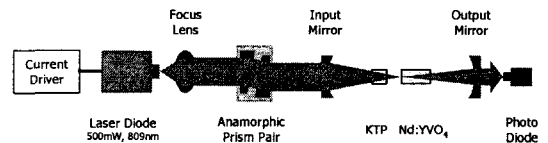


그림 1 KTP에 의한 합주파 발생 실험 장치도  
Fig.1 Experimental setup for Sum Frequency Generation on KTP

에 의해 여기되고 편광방향은 3mm×3mm 길이의 KTP결정의 X축 방향으로 취해 SFG에의 기여를 막아 기본파와 여기광을 구별할 수 있도록 하였다. KTP결정은 y-cut을 사용하고 KTP 결정의 위치를 반도체 레이저측에 위치시켜 보다 많은 809nm의 입력이 가능토록 하였다. 또한 KTP의 표면은 합주파의 기본파인 809nm와 1064nm에 대해 무반사 코팅을 하였다. 입력반사경(CVI, 크기 : 0.5" dia × 3/8")은 BK-7재질을 사용하였고 곡률 반경은 10mm이다. 반사코팅은 1064nm에 대하여 HR, 중심파장 808nm에 대해 HT : >95%의 특성을 갖도록 설계하였다고 반사경의 바깥쪽 면은 808nm에 대해 무반사 코팅을 하였다. 출력 반사경(CVI, 크기 : 0.5" dia × 3/8")은 1064nm에 대하여 투광률 0.5%, 808nm에 대해 반사율80%, 459nm에 대하여 80% 이상의 투과율 특성을 갖도록 코팅하였다. 또한 출력 반사경의 바깥쪽 표면은 459nm에 대해 무반사 코팅을 하였다. 출력 반사경의 곡률반경은 50mm이다. Collimation 렌즈는 양면을 모두 809nm에 대해 무반사 코팅 처리를 하였고, Bi-convex 형태를 갖춘 초점거리 5mm, 10mm, 15mm의 렌즈로 각 실험 조건에 따라 사용하였다. KTP와 Nd:YVO4결정 사이에는 100 $\mu$ m의 마일러 필름을 삽입하였다. KTP의 레이저 매질쪽 가까운 곳에 여기광이 집속되게끔 위치를 정하였다. Nd:YVO4결정을 방열을 고려하여 Brass 재질의 지지대에 위치시켰다. KTP의 방위는 Buamert[5]의 실험결과로부터 비임계 위상정합조건으로 각축 방향으로 90도를 유지하였다. 그림 2에 KTP에 의한 합주파 발생 실험의 결과를 보인다. 그림의 가로축은 반도체 레이저의 입력 Power를 나타내고 세로축은 청색 레이저의 출력 특성을 보인다. 청색 레이저의 관측은 350nm로부터 1100nm 까지 측정할수 있는 Electro - Optics Technology사의 Silicon Photodetector (ET2000)를 사용하였다. 합주파 발생에 의한 청색레이저는 반도체 레이저의 입력 Power가 120mW일때부터 관측 되었으며 0.1mW를 보였다. 최대의 출력은 입력 Power가 400mW일때 0.95mW를 기록하였다. Nd:YAG 레이저의 경우에는 결정의 편광이 랜덤하기 때문에 합주파에의 기여가 출력의 절반 정도로 예상된다. 그러나 본 연구에서 사용된 Nd:YVO4레이저는 직선 편광으로 발진하므로 보다 높은 파장 변환 효율을 가졌으며, 또한 광학계와 공진기 구성을 보다 최적화하고 반도체 레이저의 고출력화 등으로 보다 높은 효율의 동작 특성이 기대된다.

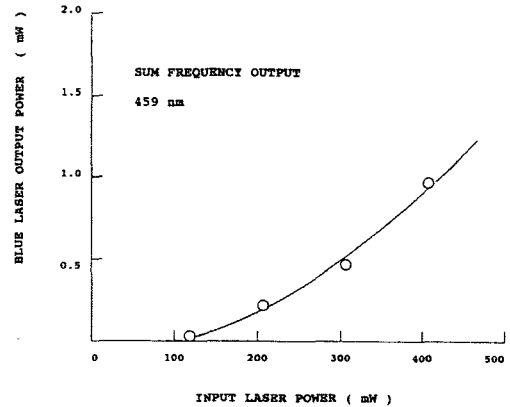


그림 2 청색레이저 출력의 반도체 레이저 입력 Power 의존성  
Fig. 2 Blue laser power as a function of LD input power

#### IV. 결 론

고출력 반도체 레이저의 발전과 함께 이를 여기원으로 하는 고체 레이저가 현재 고효율의 동작 특성을 갖고 있다. 레이저 다이오드로 여기되는 고체 레이저들은 거의 적외선 영역에서 발진하기 때문에 고밀도 광기록용 광원 등의 응용을 위해서는 적당한 비선형 결정 소자와의 결합으로 합주파 발생 혹은 제 2 고조파발생등의 방법에 의해 녹색 혹은 청색 레이저로의 파장 변환이 필요하다.

본 연구에서는 비선형 결정 소자 KTP를 사용하여 반도체 레이저만으로 여기되는 Nd:YVO<sub>4</sub>레이저의 합주파 발생 실험을 행하였다. 제 2 종의 위상 정합 조건인  $\psi = 90^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ 의 조건에서 실험을 행하였다. 청색레이저의 출력은 반도체레이저의 입력 Power가 120mW일 때부터 관측되었고 최대 청색레이저 출력은 입력광의 세기가 400mW일 때 0.95mW이었다.

#### 참고문헌

- [1] M. A. Haase, K. Qui, J. M. DePuydt, H. Cheng, Appl. Phys. Lett., 59, 1272(1991)

- [2] C.J. van der poel, J. D. Bierlein, J. B. Brown, and S. colak,  
Appl. Phys. Lett., 57, 977(1990)
- [3] T. Baer, J. Opt. Soc. Am. B. 3, 1175(1986).
- [4] M. Oka and Kubota, Opt. Lett. 13, 805(1988)
- [5] J. C. Baumert, F. M. Schellenberg, W. Lenth, W. P. Risk,  
and G. C. Bjorklund, Appl. Phys. Lett., 51, 2192(1987)

### 저자소개



#### 이 영 우(Young-Woo Lee)

1985년 2월 : 경희대학교 대학원  
전자공학전공(공학석사)

1990년 5월 : 일본 Keio University  
전기공학 전공(공학박사)

1990년 6월-1992년 2월: 독일 Max-Planck 연구소 연구원

1992년 3월 - 현재 : 목원대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : Bio Photonics