

실시간 자기상관계의 제작과 CW mode-locked Nd:YLF 레이저의 펄스폭 측정

안승준 · 전영민 · 공홍진

한국과학기술원 물리학과

(1991년 9월 30일 받음)

극초단 레이저 펄스의 펄스폭(pulse width)을 측정하기 위하여 SHG방법을 이용한 실시간(real time) 자기상관계(autocorrelator)를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 자기상관계의 측정범위는 142 ps이며, 지연(delay) block을 한쪽 arm에 삽입하면 250 ps까지 측정범위가 확장된다. CW mode-locked Nd:YLF 레이저의 공진기 길이가 mode-locker의 RF 주파수와 matching 되었을때 가장 짧은 20 ps의 펄스폭을 측정 하였으며, 공진기 길이를 detuning함에 따라 39 ps와 47 ps의 펄스폭을 측정 하였다.

I. 서 론

극초단 레이저 펄스의 발생은 레이저의 mode-locking에 의해 가능하게 되었다. 이러한 짧은 펄스들의 펄스폭을 전자적으로 측정하는 데에는 한계가 있다. 기존의 고성능 oscilloscope와 fast photodiode를 사용해도 50~100 ps 까지 밖에 측정할 수 없다. Streak 카메라를 사용하면 수백 fs까지 가능하나 그 장비의 가격이 워낙 고가이기 때문에 구입하여 사용하기가 용이하지 않다.

이러한 이유들로 해서 극초단 레이저 펄스의 펄스폭 측정에 광학적 자기상관계(optical autocorrelator)가 널리 이용되고 있다. 광 자기상관계는 상관함수(correlation function)를 이용하여 간접적으로 펄스폭을 구하는 방법인데, 광학적 Kerr shutter를 이용하는 방법^[1], 이광자 형광(two photon fluorescence, 이하 TPF)을 이용하는 방법^[2], 그리고 제2차 고조파 발생(second harmonic generation, 이하 SHG)을 이용하는 방법이 있는데 이들중 SHG방법을 가장 많이 이용한다. SHG방법으로 자기상관을 측정하는 장치를 자기상관계라 하는데, 반복율이 수 kHz 이상의 CW mode-locked 레이저에(본 연구에 사용된 레이저는 Quantronix사 Model No. 4216 Q-switched and mode-locked Nd:YLF 레이저로서 반복율이 100 MHz임) 대하여 수십 Hz로 반복 scanning함으로써 광학적 상관을 oscilloscope로 볼 수 있는 실시간 자기상관계와^[3] 반복율이 낮은 레이저에서 single shot으로 상관을 측정하는 single shot 자기상관계가^[4] 있다.

본 연구에서는 극초단 레이저 펄스의 펄스폭 측정을 위하여 KDP(Potassium Dihydrogen Phosphate) 결정을 비선형 매질로 사용하여 비공선 1종 위상접합(non-collinear type I phase matching)에 의한 실시간 자기상관을 개발하였다.

II. 이 론

I. 자기상관 함수^[5]

진동수가 ω 인 광펄스 $E(t)$ 의 규격화 2차 강도 자기상관함수 $g^2(\tau)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$g^2(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E^2(t)E^2(t+\tau)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} E^4(t)dt} \quad (1)$$

$$E(t) = \xi(t) \cos[\omega t + \phi(t)] \quad (2)$$

이때 $\xi(t)$ 는 $E(t)$ 의 진폭함수이고 $\phi(t)$ 는 위상으로서 ωt 에 비해 훨씬 느리게 변한다.

또, 광시간 평균(optical time average)을 $\langle f(t) \rangle_t = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} dt f(t)$ 라 정의하면 $g^2(\tau)$ 는

$$g^2(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dt \xi^2(t)\xi^2(t+\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} dt \xi^4(t)} \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cos 2\omega\tau \right) \quad (3)$$

로 주어진다.

이것은 시간에 따라 빨리 변하기 때문에 '빠른상관'^[6]

Table 1. 2nd-order autocorrelation functions and bandwidth relations for various functions. All bandwidths are FWHM.^[6]

$I(t)$ ($x = t/T$)	$\Delta\nu\Delta t$	τ_r/T	$G^2(\tau)$ ($y = \tau/T$)	τ_G/T	τ_r/τ_G
Gaussian e^{-x^2}	0.4413	$2(\ln 2)^{1/2}$	$e^{-y^2/2}$	$2(2\ln 2)^{1/2}$	0.7071
$\text{sech}^2 x$	0.3148	1.7627	$\frac{3(y \coth y - 1)}{\sinh^2 y}$	2.7196	0.6482
Lorentzian $1/(1+x^2)$	0.2206	2	$1/[1+(y/2)^2]$	4	0.5
one-sided exp. $e^{-x} (t \geq 0)$ $0 (t < 0)$	0.1103	$\ln 2$	$e^{- y }$	$2\ln 2$	0.5

이라고 하며 $g^2(\tau)$ 를 τ 에 대해 시간평균화 한뒤 규격화 하면

$$G^2(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dt \xi^2(t) \xi^2(t+\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} dt \xi^4(t)} \quad (4)$$

가 되는데 이를 '느린상관' ^[6]이라 한다. 실제 실험에서는 파장보다 짧은 거리를 분해하여 변화시켜 주지 못하기 때문에 느린상관을 측정하게 된다. $E(t)$ 의 광학적 시간 평균강도 $I(t)$ 는 $I(t) \propto \langle E(t) \rangle_t = \xi^2(t)$ 이며, 느린상관함수 $G^2(\tau)$ 는

$$G^2(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} dt I(t) I(t+\tau)}{\int_{-\infty}^{\infty} dt I^2(t)} \quad (5)$$

이다.

여러가지 함수 $I(t)$ 에 대한 상관함수 $G^2(\tau)$ 와, 관련된 여러가지 펄스들의 반치폭(FWHM: Full Width at Half Maximum)들 사이의 관계가 Table 1에 정리되어 있다.

2. 2차 고조파의 발생(SHG) ^[7]

SHG를 이용하는 비선형 상관법에는, SHG를 위한 위상정합 조건(phase matching condition)에 따라 여러 가지 방법이 있는데, 본 연구에서는 공선 1종(collinear type I) ^[8]과 비공선 1종(non-collinear type I) ^[9] 특히 42 m 대칭을 갖는 부단축(negative uniaxial) 결정(KDP 결정이 여기에 해당된다)에 대해서 고려하였다. Fig. 1은 공선 1종 상관법을 설명하는 그림이다. Fig. 1에서, 입사하는 두 기본파는 서로 τ 의 시간차를 갖는 동일한 광펄스로서 공선적이며 정상(ordinary) 광선이다. 2차 고조파는 이상(extraordinary) 광선으로서 역시 공선적이다. 위상정합 조건은, $n_o^* = n_e^{2\omega}(\theta_m)$ (부단축 결정)로 주어지는데, 이때 n 은 굴절률, "o"는 정상광선, "e"는 이상광선, ω 는 기본파의 각주파수, θ_m 은 위상 정합각을

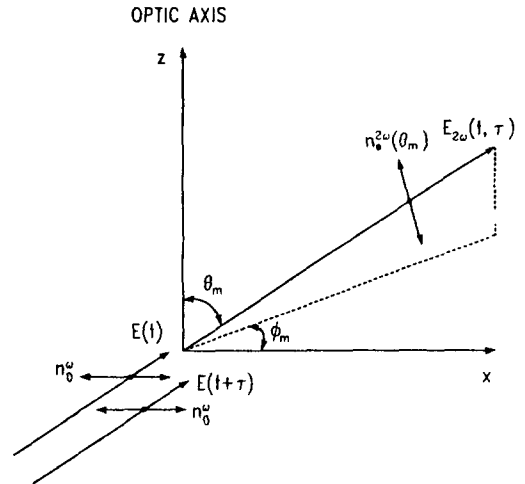


Fig. 1. Collinear type I phase matching for SHG in a negative uniaxial crystal to obtain optical correlation with background $1+2G^2(\tau)$. All wave vectors are collinear.

나타낸다. 위상 정합각 θ_m 은

$$\frac{1}{n_e^{2\omega}(\theta)} = \frac{\cos^2 \theta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \theta}{n_e^2} \quad (6)$$

임을 이용하면,

$$\sin^2 \theta_m = \frac{(n_o^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}}{(n_o^{2\omega})^{-2} - (n_e^{2\omega})^{-2}} \quad (7)$$

이며, 허용각(acceptance angle) $\Delta\theta$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{\omega l \sin 2\theta_m} \cdot \frac{1}{(n_o^{2\omega})^3} \frac{1}{(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}}$$

$$\approx \frac{\pi}{\omega l \sin 2\theta_m} \cdot \frac{1}{n_o^{2\omega} - n_r^{2\omega}}$$

또한, 유효 2차 비선형 감수율(effective second order nonlinear susceptibility) $\chi_{eff}^{(2)}$ 는 $\chi_{eff}^{(2)} = \chi_{14} \sin \theta \sin 2\phi$ 이므로, 고조파 강도가 최대가 되도록 $\chi_{eff}^{(2)}$ 를 최대화 시키는 ϕ 값은 $\phi = 45^\circ$ 이다. 식 (2)를 이용하여 두 기본파를 $E(t), E(t+\tau)$ 로 표시하면, 고조파 $E_{2\omega}(t, \tau)$ 는 $E_{2\omega}(t, \tau) \propto [E(t) + E(t+\tau)]^2$ 로 나타낼 수 있으며, 검출되는 고조파의 강도 $V(\tau)$ 는 다음을 만족시킨다.

$$V(\tau) \propto \left\langle \int_{-\infty}^{\infty} dt [E(t) + E(t+\tau)]^2 \right\rangle, \\ \propto \int_{-\infty}^{\infty} dt I^2(t) + 2 \int_{-\infty}^{\infty} dt I(t)I(t+\tau) \\ \propto 1 + 2G^2(\tau) \quad (9)$$

여기서, $\tau > \tau_p$ (펄스폭)가 되어 $G^2(\tau) = 0$ 일때도 $V(\tau)$ 의 값이 존재하므로, 공선 1종 상관을 무배경상관(correlation with background)^[8]이라고도 한다.

Fig. 2는 비공선 1종 상관법을 나타내는데, 입사하는 두 기본파는 서로 τ 의 시간차를 갖는 동일한 펄스로서, 둘다 정상광선이지만 서로 비공선적이다. 2차 고조파는 이상광선으로서, 두 기본파가 동시에 지나갈때, 그 이등분선의 방향으로 진행한다.(실제로 기본파는 정상광선이 아니지만, α 가 작거나 θ_m 이 0보다 충분히 큰 경우에는

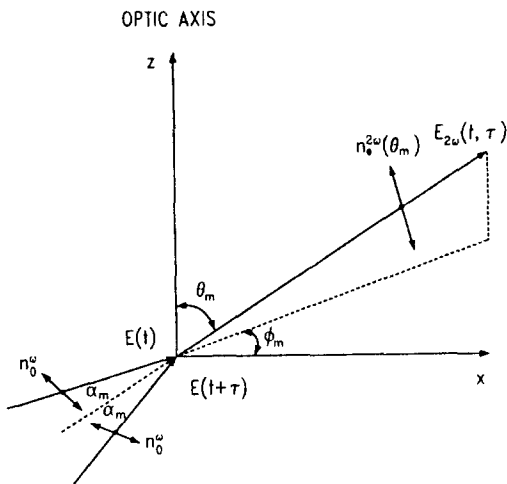


Fig. 2. Non-collinear type I phase matching for SHG in negative uniaxial crystals to obtain background free correlation $G^2(\tau)$. All wave vectors are on the same plane but for the polarization vector of the second harmonic wave.

정상광선으로 근사시킬 수 있다).

이때, 위상정합 조건은 $n_o^{\omega} \cos \alpha_m = n_r^{2\omega}(\theta_m)$ (부단축 결정)이며 α_m 은 두 기본파가 이루는 각의 반이다. $\Delta\theta, \phi_m$ 은 공선 1종의 경우와 같고, α_m 에 대한 허용각은 다음과 같다.

$$\Delta\alpha = \frac{\pi}{\omega n_o^{\omega} \sin \alpha_m} \quad (10)$$

비공선 1종 상관의 경우, 고조파 $E_{2\omega}(t, \tau)$ 는 $E_{2\omega}(t, \tau) \propto E(t)E(t+\tau)$ 이며 검출되는 고조파의 강도 $V(\tau)$ 는 다음을 만족시킨다.

$$V(\tau) \propto \left\langle \int_{-\infty}^{\infty} dt [E(t)E(t+\tau)]^2 \right\rangle, \\ \propto \int_{-\infty}^{\infty} dt I(t)I(t+\tau) \\ \propto G^2(\tau) \quad (11)$$

이때, $t > \tau_p$ 가 되어 $G^2(\tau) = 0$ 이면 $V(\tau) = 0$ 이므로, 비공선 1종 상관을 무배경 상관(background free correlation)^[9]이라고도 한다.

III. 자기상관계의 제작과

CW mode-locked Nd:YLF 레이저의 펄스폭 측정

1. 자기상관계의 scheme

발전기(CW mode-locked Nd:YLF 레이저)에서 나오는 극초단 레이저 펄스의 펄스폭을 측정하기 위해서 자기상관계를 제작하였다. 비선형 매질로는 두께가 10 mm인 KDP 결정을 사용했으며 비공선 1종 상관법을 채택하여 무배경상관, scanning type 자기상관계를 제작하였다. Fig. 3은 본 연구에서 제작된 자기상관계의 실험 장치도이다. 반사율이 50%인 광분할기에 입사한 광펄스는, 같은 비율로 나누어져, 회전 block으로 입사하게 된다. 회전 block에 입사하는 각 펄스의 입사각, θ 와 ϕ 는 $\theta + \phi = 75^\circ$ 로 설계, 제작되었다.

회전 block을 통과한 광펄스는 되반사용 프리즘(retro reflecting prism), P_1 과 P_2 에서 다시 반사되어 회전 block을 다시 통과하게 되는데, 회전 block을 통과한 두 광펄스들 사이에는 $L(\theta, \phi)$ 만큼의 광로차이(OPLD: Optical Path Length Difference)를 갖게 된다. 되반사용 프리즘을 사용하여 광파를 shift시키는 것은 나중에 볼록렌즈를 사용하여 배경(background)이 없는 비공선 1종 상관법으로 펄스폭을 측정하기 위해서 이다. 즉, $L(\theta, \phi)$ 만큼 OPLD를 가진 두 광파는 광분할기에서 비공선적으로 다시 만나게 되는데, 볼록렌즈를 사용하여 phase

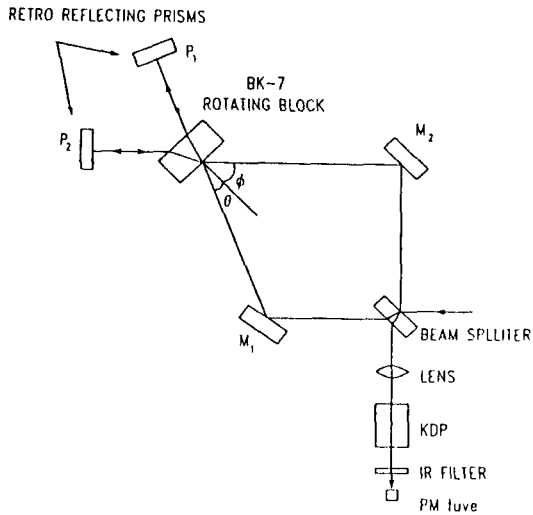


Fig. 3. Schematic diagram of the present scanning optical autocorrelator to measure the pulse width as real time.

matching angle로 KDP결정에 접속시키면 2차 고조파가 발생하게 된다. 이때 발생하는 고조파의 강도는 OPLD가 0일 때 최대가 되며 OPLD가 커질 수록 점점 약해져서, t_0 보다 충분히 더 큰 OPLD에서는 고조파의 강도가 0이 된다.

광펄스가 KDP를 통과하고 나면 주파수가 ω 인 기본파와 2ω 인 2차 고조파가 섞여 나오게 되는데, 기본파를 제거하기 위하여 Oriol사 No. 51970 IR blocking color glass filter(기본파의 투과율: 10^{-6} , 고조파의 투과율: 0.7)를 사용하였다. IR filter를 통과한 고조파는 PM tube로 검출하여 oscilloscope와 chart recorder로 관찰하였다.

본 실험에 사용된 비선형 물질, KDP결정은 solution growing방법으로^[10]성장시켰으며, 파장이 $1.053 \mu\text{m}$ 인 광원에 대해 1종 위상정합을 이루도록 가공하였으며, 각도를 조정하므로써 비공선 1종 위상정합에 맞추게 되어있다. 그리고 polishing 직후 습기에 의해 표면이 뿌옇게 되지 않도록 기본파의 입사면을 무반사 coating검 표면 보호막으로 MgF_2 를 $\lambda/4$ 만큼 증착시켰다.

2. 광로정(optical path length)의 계산

Fig. 3에서 보는 바와 같이, 광분할기에서 같은 비율로 나누어진 광펄스가 각 arm을 진행하면서 생긴 두 펄스 사이의 광로정차이, OPLD는 BK-7 block의 회전 때문에 발생한다. Block에 입사하는 두 광파의 입사각을 각각 θ, ϕ 로 정의 하면 OPLD는 θ 와 ϕ 의 함수로 주어진다.

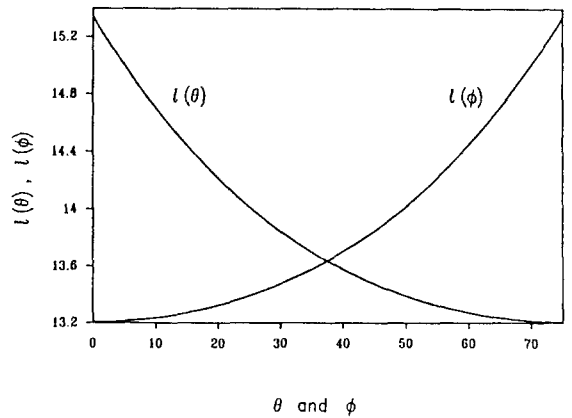


Fig. 4. Optical pathlength $l(\theta)$ and $l(\phi)$.

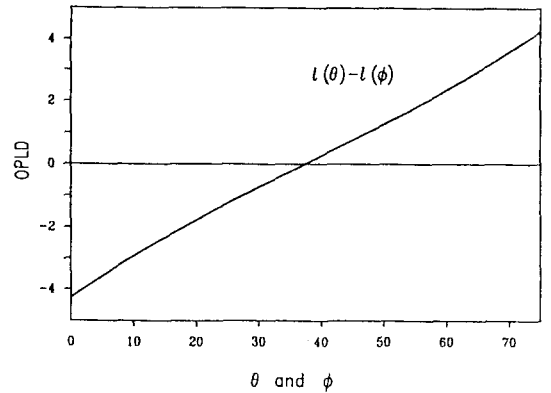


Fig. 5. OPLD, $l(\theta)-l(\phi)$ as function of the incident angle at rotating block, θ and ϕ .

Block이 회전함에 따라 변하는 각 arm의 광로정 $l(\theta)$ 와 $l(\phi)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$l(\theta) = L + t \cdot (\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} - \cos\theta) + t,$$

$$l(\phi) = L + t \cdot (\sqrt{n^2 - \sin^2\phi} - \cos\phi) + t \tag{12}$$

여기서 L 은 $\theta, \phi=0$ 일때, 회전 block 밖에서 광펄스가 진행한 광로정이며, n 은 BK-7 block의 굴절율($n=1.50669$ at $\lambda=1.053\mu\text{m}$)이며, t 는 block의 두께를 나타낸다. 따라서, 자기상관계 양쪽 arm 사이의 OPLD $L(\theta, \phi)$ 는

$$L(\theta, \phi) = 2t \cdot (\sqrt{n^2 - \sin^2\theta} - \cos\theta - \sqrt{n^2 - \sin^2\phi} + \cos\phi) \tag{13}$$

식 (13)의 인자 2는 펄스가 block을 두번 지나기 때문에

고려된 인자이다. Fig. 4는 각 arm의 광로정 $l(\theta)$ 와 $l(\phi)$ 의 graph이며, Fig. 5는 OPLD, $L(\theta, \phi)$ 의 graph인데, OPLD값이 선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제작된 자기상관계는 $\theta + \phi = 75^\circ$, $l = 54$ mm로 설계되었다. 따라서 최대 OPLD는 42.6 mm이며, 지연 block을 사용하지 않고, 본 자기상관계로 측정할 수 있는 최대 범위는 142 ps이다.

3. CW mode-locked Nd:YLF 레이저의 펄스폭 측정

Fig. 6은, 최대 측정범위가 142 ps, BK-7 block을 회전시키는 stepping motor의 회전수가 0.968 turn/min, chart recorder의 scanning 속도를 4.17 mm/sec로 한 다음, 자기상관계로 측정한 autocorrelation trace이다.

다음과 같이 Fig. 6의 autocorrelation trace로 부터 펄스폭을 계산할 수 있다.

$$\frac{75^\circ}{360^\circ} \cdot \frac{\text{revolution}}{\text{scan}} \times \frac{62}{1} \cdot \frac{\text{sec}}{\text{revolution}} = 12.92 \cdot \frac{\text{sec}}{\text{scan}}$$

$$(142 \cdot \frac{\text{ps delay}}{\text{scan}}) / (4.167 \cdot \frac{\text{mm}}{\text{sec}} \times 12.92 \cdot \frac{\text{sec}}{\text{scan}}) = 2.64 \cdot \frac{\text{ps delay}}{\text{mm}}$$

(14)

입사 광펄스의 파형을 Gaussian이라 가정하면(Table 1 참조), 식 (14)로부터 펄스폭은

$$\text{pulse width (ps)} = 1.865 \times \text{FWHM (mm units)} \quad (15)$$

로 환산할 수 있다. Mode-locked된 레이저에서, 공진기 길이를 detuning시킴에 따라 레이저의 펄스폭이 약간씩 변하게 되는데,^[11] Fig. 6의 autocorrelation trace를 식 (15)로 환산하면 레이저의 펄스폭은 (a) 20 ps, (b) 39 ps, (c) 47 ps가 됨을 알 수 있다. Fig. 6의 (a)는 레이저의 공진기 길이가 mode-locker의 RF 주파수와 matching

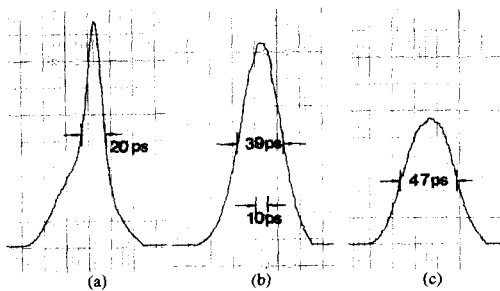


Fig. 6. Autocorrelation trace with pulse width (a) 20 ps, when the cavity length was well matched to the RF frequency of the mode-locker, and (b) 39 ps and (c) 47 ps, when the cavity length was detuned.

되었을 때이며, (b)와 (c)는 공진기 길이를 약간 detuning했을때의 펄스폭이다.

Block의 회전수를 빠르게 하면 (1 Hz이상 이면 가능함), oscilloscope를 사용하여 실시간으로 펄스폭을 측정할 수 있다. 자기상관계의 calibration은 두개의 되반사용 프리즘중 한쪽을 translator위에 장착한 다음, 프리즘을 일정한 거리 이동시키면 autocorrelation trace의 peak 점이 이동하는데, 그 간격을 측정함으로써 calibration할 수 있다.

IV. 결 론

극초단 레이저 펄스의 펄스폭을 측정하기 위해 자기상관계를 제작하였으며 CW mode-locked Nd:YLF 레이저의 공진기 길이를 detuning함에 따라 20 ps, 39 ps, 47 ps의 펄스폭을 측정하였다.

본 연구에서 제작되었던 자기상관계는, 비선형 매질로 두께 10 mm의 KDP결정을 사용하였으며 OPLD를 주기 위해 150×54×10 mm³의 BK-7 block을 회전시켜 비공선 1종 상관법을 채택한 무배경상관, scanning type 자기상관계이다.

자기상관계로 측정할 수 있는 펄스폭의 범위는 142 ps인데, 이는 기존의 상업적으로 개발된 자기상관계(IN-RAD Model 5-14B, Spectra-Physics Model 490 등)의 측정범위(80~90 ps)보다 1.8배 정도 더 넓다. 비선형 매질을 두께가 1 mm인 KDP 결정으로 교체시키면 KDP결정의 분산이^[12] 있더라도 1~0.1 ps의 극초단 펄스의 펄스폭도 충분히 측정할 수 있다. 본 자기상관계의 한쪽 arm에 두께가 30 mm의 지연 block을 추가로 삽입하게 되면, 펄스폭이 200~250 ps인 펄스까지도 무난히 측정할 수 있게 될 것이다.

Reference

[1] M. A. Duguay and J. W. Hannsen, Appl. Phys. Lett. **15**, 192 (1969).
 [2] J. A. Giordmaine, P. M. Rentzepis, S. L. Shapiro and K. W. Wecht, Appl. Phys. Lett. **11**, 216 (1967).
 [3] Z. A. Yasa and N. M. Amer, Opt. Comm. **36**, 406 (1981).
 [4] S. M. Saltiel and K. A. Stankov, Appl. Phys. **B35**, 45 (1984).
 [5] Y. M. Jhon, M. S. Dissertation, KAIST (1988).
 [6] K. L. Sala, G. A. Kenney-Wallace and G. E. Hall, IEEE J. QE-**16**, 990 (1980).

- [7] A. Yariv, *Optical Electronics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York (1985).
[8] D. Gloge and T. P. Lee, *J. Appl. Phys.* **42**, 307 (1971).
[9] M. Maier, W. Kaiser and J. A. Giordmaine, *Phys. Rev. Lett.* **17**, 1275 (1966).
[10] D. E. Khamskii, *Crystallization from Solutions*, Consultants bureau, New York (1969).
[11] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering*, Springer-Verlag, New York (1976).
[12] R. C. Miller, *Phys. Lett.* **26A**, 177 (1968).

Development of Real Time Autocorrelator and the Measurement of Pulse Width of CW Mode-Locked Nd:YLF Laser

Seung Joon Ahn, Young Min Jhon and Hong Jin Kong

*Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology
373-1 Kusong-dong, Yusong-gu, Taejon, Korea*

(Received: September 30, 1991)

The real time autocorrelator has been developed in order to measure the pulse widths of ultrashort laser pulses using the SHG method. The scanning range of the autocorrelator is 142 ps, and inserting a delay block in one arm of the autocorrelator, the scanning range can be extended to 250 ps. The shortest pulse width was measured to be 20 ps, when the cavity length was well matched to the RF frequency of the mode-locker, and broadened to be 39 ps and 47 ps as the cavity length was detuned.