

자기과충된 Ti:sapphire 레이저 발진기에서 되먹임 거울의 반사율
과 펌프 에너지의 변화에 따른 펄스발생시간 및 펄스폭

Buildup Time and Pulse Width dependent on the Reflectivity
of Feedback Mirror and the Pump Energy in a Self-Seeded
Ti:sapphire Laser Oscillator

임 권, 고도경, 김현수, 박성희, 차병헌

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

자기과충된 Ti:sapphire 레이저 발진기에서 되먹임 거울의 반사율과 펌프 에너지의 변화에 따른 펄스발생시간과 펄스폭이 조사되었다. 자기과충 공진기는 Littman형 공진기와 부분 반사율을 갖는 되먹임 거울로 구성되어있다. Q 스위칭된 Nd:YAG 레이저 제 2 조화파로 펌핑된 Ti:sapphire 레이저의 펄스발생시간을 측정한 결과, 펌프 에너지가 40 mJ/pulse이고 되먹임 거울의 반사율이 30%일 때, 펄스발생시간과 펄스폭은 175 ns과 25 ns이었다. 또한, 펌프 에너지와 반사율을 증가시킴에 따라서 출력된 레이저 펄스의 발생시간은 더욱 빨라지고 펄스폭도 짧아졌다. 반사율이 70%에서 펌프 에너지가 60 mJ/pulse 일 때, 펄스발생시간과 펄스폭은 30 ns과 7 ns 이었다.

Abstract

The buildup time, the pulse width(FWHM) have been investigated as a

function of the reflectivity of feedback mirror and the pump energy in a self-seeded Ti:sapphire laser oscillator. Self-seeded cavity was composed of a Littman cavity and feedback mirror. The Ti:sapphire laser oscillator pumped with the 2nd harmonic of the Q-switched, pulsed Nd:YAG laser. According to the experimental results, when the pump energy was 40 mJ/pulse at the reflectivity 30% of feedback mirror, the buildup time and the pulse width were 170 ns and 25 ns, respectively. As the pump energy and the reflectivity are increased, the output pulse built up faster and the pulse width became shorter. When the pump energy was 60 mJ/pulse at the reflectivity 70% of feedback mirror, the buildup time and the pulse width were 30 ns and 7 ns, respectively.

1. 서론

주입파종(injection seeding)에 의한 레이저 발생 연구는 선폭 축소와 출력 향상을 목적으로, CW 혹은 펄스형 주공진기(master oscillator)로부터 얻은 양질의 seeder 광을 종공진기(slave oscillator)에 주입하여 자극방출에 의한 증폭을 유도함으로써 높은 에너지 전환효율이 발생하도록 한다. 1986년 P. Brockman은 파장 727 nm에서 좁은 선폭의 펄스형 색소 레이저를 등초점형 Ti:sapphire 레이저에 주입하여 2.5 pm 선폭을 갖는 Ti:sapphire 레이저의 출력을 얻었다.^[1-4] 그러나, 주공진기와 종공진기를 결합하여 이중 공진기로 구성하면, 공진기 내부에서 광손실을 줄여줌으로써 에너지 변환효율을 높여줄 수 있다. 이러한 자기파종(self-seeding)형 공진기로서 1992년 M. R. H. Knowles는 Ti:sapphire 레이저 매질에 고리형 공진기를 구성하고 레이저 출력 방향중 한쪽면에 되먹임 거울을 장착하여 레이저 공진기의 방향을 결정하도록 하였다. 주입된 seeder 광은 출력경에 의해서 되반사됨으로 종공진기 내에서 펌프 펄스의 존재시간동안 자발방출광을 유도자극하여 증폭시키는 재생 증폭기의 역할을 한다고 보고한 바가 있다.^[5-8] 주공진기의 레이저 특성은 좁은 선폭의 레이저를 발생시킬 수 있어야 한다. 이와 같은 연구로서 K. W. Kangas는 Ti:sapphire를 이용하여 Littman형 발진기를 구성

하고 단일 종모드의 레이저 발진에 성공하였다.^[9] 여기서 Littman형 주공진기에 되먹임 부분반사거울을 장착한 self-seeding Ti:sapphire 레이저 발진기에 대한 연구가 1995년에 D. K. Ko^[10]에 의해 보고되었으며 자기파종의 출력 특성이 보고되었다.

본 논문에서는 Ti:sapphire를 이득매질로 하여 Littman형 주공진기와 정상파형 종공진기로 구성된 자기파종형 발진기를 구성하였고, 되먹임 거울의 반사율과 펌프 에너지의 변화에 따른 레이저 출력의 펄스발생시간과 펄스폭의 변화를 측정하였다.

2. 본 론

Ti:sapphire 결정은 Union Carbide의 제품으로 길이 20 mm, 직경 5 mm이며 532 nm 에서 흡수 계수는 2.4 cm^{-1} 이며 Titanium의 doping 농도는 0.15 m.w.%이다. 그리고, 펌프광이 입사시 표면반사를 없애기 위해 Brewster 각으로 절단되어있다. 반사회절격자는 1800 grooves/mm로써 American Holographic 사의 제품을 사용하였다. 그림 1과 같이, 주공진기인 Littman형 공진시에 회절격자에 입사되는 빔은 약 89도로서 매우 비스듬한 각으로 입사된다. 본 실험에서 사용한 되먹임 부분반사 거울은 파장 760 nm~810 nm에서 30%, 50%와 70%의 반사율을 가지고 있으며 후면경과 파장가변거울 역시 같은 파장영역에서 99%이상의 반사율을 갖는다. 각각의 주공진기와 종공진기의 길이는 6 cm, 16 cm 이다. 532 nm 펌프 광의 집속렌즈 초점거리는 30 cm인 것을 사용하였다. 집속시에는 약간 defocusing한 뒤에 초점거리를 적당히 조절함으로써 Ti:sapphire의 표면에 손상이 가지 않도록 하였다. 이 때 집속광의 직경은 약 3 mm 정도이었다.

Ti:sapphire 결정의 발진파장영역은 760 nm ~ 820 nm까지 대단히 넓게 분포한다. 이처럼 Ti:sapphire의 레이저의 이득곡선 영역에서 broadband emission으로 레이저가 방출하고 있음을 그림 3에서 보여주고 있으며 이때의 펌프 에너지는 60 mJ/pulse에서 측정한 값이다. Seeder와 broadband emission 레이저 광의 스펙트럼은 실제 측정세기를 약 30 배 확대한 것이다. Self-seeding 레이저의 스펙트럼은 seeder 스펙트럼 폭을 그대로 따르고 있으며, broadband emission을 보면 거의

50 nm에 이르는 넓은 대역의 스펙트럼이 seeder의 자체 주입(self-injection seeding)에 의하여 매우 좁은 band폭으로 에너지 몰입(energy extraction)이 되어 짐을 보여주고 있다.

그림 4는 펄스의 반치폭(FWHM)이 약 20 ns인 Nd:YAG 레이저의 제 2 조화파로 펌프하였을 때 seeder, broadband emission, self-seeding 레이저 광의 펄스 파형을 시간상에서 측정한 것인데, 펄스의 측정에 사용된 광 다이오드(photodiode)는 Newport 사의 실리콘 핀 (silicon pin) 형태의 검출기이다. 이 광 다이오드의 반응시간은 1ns이하로써 검출단면적은 0.25 mm^2 이다. Ti:sapphire 레이저의 경우는 형광수명시간이 $3.2 \mu\text{s}$ 로써 매우 길기 때문에 펌프 광의 펄스폭에 비해 레이저 발진시간이 늦게 지연된다. 본 실험에서는 펌프 광의 펄스가 입사된 뒤에 약 35 ns 후에 seeder 레이저가 발생하고 약 100 ns 뒤에 free-running에 의한 넓은 대역폭의 레이저 광이 발생하였으며, 자기과종형 공진기로부터 출력된 self-seeding 레이저 광의 발생시간은 seeder 레이저 광이 발생하면서 유도자극방출에 의해 Gain 스위칭된 레이저로 발생한다. 이와 같은 주공진기의 seeder 레이저가 주입되었을 때 종공진기의 펄스발진시간이 앞당겨지는 현상은 injection seeding의 전형적인 현상으로써 반사거울의 반사율이나 공진기 길이 또는 펌프 에너지 등으로 인해 펄스의 발생시간은 조절될 수 있다. 펌프 광과 self-seeding 된 레이저 광의 펄스폭은 각각 13ns와 9 ns으로 측정되었다.

출력경으로 사용되는 되먹임 부분반사거울(feedback partial reflector)의 반사율의 변화에 따른 출력 펄스의 발생시간을 측정하였다. 그림 5에서 그림 7은 반사율을 30%, 50%, 70%로 바꾸면서 각각의 반사율에서 펌프 에너지의 변화에 따른 출력 펄스 파형을 측정한 것이다. 그림 5-(a)와 같은 경우는 반사율이 30 %이며 펌프 에너지는 40 mJ/pulse의 경우에 대한 것이다. 이 경우 펌프 펄스의 에너지가 매 펄스마다 요동이 있기 때문에 사실상 펌프 에너지의 변화가 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 다른 조건의 결과인 그림 6과 그림 7에서도 펌프 펄스의 펄스당 에너지 요동 때문에 같은 조건에서 얻은 결과일지라도 self-seeding 출력 펄스의 펄스발생시간이 다르게 나타나고 있다. 그러나, 반사율이 낮고 펌프 에너지도 낮은 경우에서보다 반사율이 높고 펌프 에너지가 높은 경우에서 self-seeding 출력 펄스의 발생 시간이 안정되어 있고 펄스폭 또한 좁은 것을 볼 수 있다. 이처럼

self-seeding 레이저 출력의 펄스를 조절하는 방법으로써 되먹임 부분반사거울의 반사율과 펌프광의 펄스 에너지를 조절하여 펄스발생시간을 변화시킬 수 있음을 확인하였다. 결과적으로, 반사율 30%, 펌프 에너지 40mJ/pulse에서 펄스의 발생시간은 최고 약 170 ns 정도 뒤에 발생하였으며, 반사율 70%, 펌프 에너지 60 mJ/pulse에서 펄스발생시간이 최소 25 ns까지 앞당겨졌다. 즉, 펌프 에너지와 반사율의 조절에 의해서 펄스폭(FWHM)이 좁아짐을 확인하였다. 그리고, 각각의 반사율에서 펌프 에너지의 변화에 따른 펄스발생시간을 그래프로 그린 것이 그림 8이다. 실험상의 측정치중에 가장 짧은 펄스폭은 약 7 ns인 경우로서, 이 때 출력경의 반사율은 70%이었고 펌프 에너지는 60 mJ/pulse이었다.

펌프 에너지의 증가는 공진기내의 Q-값을 증가시킴으로써 레이저 광자의 펄스발생시간을 빨라지게 하였다. 또한, 반사율을 높임으로써도 출력경을 통해 출력되는 펄스발생시간도 앞당겨지게 되는 것을 보이기 위하여 30 %의 반사율을 사용한 경우, 40 mJ/pulse, 50 mJ/pulse, 60 mJ/pulse의 펌프 에너지에서 가장 빠른 펄스발생시간을 갖는 펄스들만을 택하여 펄스변화를 나타낸 것이 그림 9이다. 출력 펄스의 펄스발생시간이 에너지에 따라 앞당겨짐을 보여주고 있다. 되먹임 부분반사거울의 반사율이 50 %인 경우와 70%인 경우에 대하여도 그림 10, 그림 11과 같이 펄스발생시간이 앞당겨지며 펄스의 폭도 좁아짐을 알 수 있다. 또한, 반사율 30%인 경우보다 반사율 70%인 경우에서 펄스의 모양이 Gaussian의 대칭적인 펄스형태로 발진함을 보여주고 있다.

3. 결 론

자기과충된 Ti:sapphire 레이저 발진기에서 되먹임 거울의 반사율과 펌프 에너지의 변화에 따른 펄스발생시간과 펄스폭이 조사되었다. 자기과충 공진기의 부분 반사율을 갖는 되먹임 거울의 반사율이 30%이고 펌프 에너지가 40 mJ/pulse 일 때, 펄스발생시간과 펄스폭은 175 ns과 25 ns이었다. 반사율이 70%에서 펌프 에너지가 60 mJ/pulse 일 때, 펄스발생시간과 펄스폭은 30 ns과 7 ns 이었다. 결론적으로, 펌프 에너지와 반사율을 조절함으로써 공진기내의 광자 밀도가 조절되었고 이에 따라서 출력된 레이저 펄스의 발생시간과 펄스폭이 변화됨을 보여주었다.

참고논문

- [1] P. Brockman, C. H. Bair, J. C. Barnes, R. V. Hess, and E. V. Browell, “Pulsed injection control of a Titanium-doped sapphire laser,” *Opt. Lett.* 11, 712 (1986).
- [2] C. H. Bair, P. Brockman, R. V. Hess, and E. V. Moldin, “Demonstration of frequency control and CW diode laser injection control of a Titanium-doped sapphire ring laser with internal optical elements,” *IEEE J. Quantum Electron.* QE-24, 1045 (1988).
- [3] G. A. Rines and P. F. Moulton, “Performance of gain-switched $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ unstable-resonator lasers,” *Opt. Lett.* 15, 434 (1990).
- [4] T. D. Raymond and A. V. Smith, “Injection-seeded Titanium-doped-sapphire laser,” *Opt. Lett.* 16, 33 (1991).
- [5] M. R. H. Knowles and C. E. Webb, “Cavity configuration for Copper vapour laser pumped Titanium sapphire lasers,” *Opt. Commun.* 89, 493 (1992).
- [6] C. E. Hamilton, *Opt. Lett.* 17, 728 (1992).
- [7] G. Y. Yin, A. Kasapi, M. Jain, and A. Merriman, in *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Vol. 8, 1994 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D.C., 1994), paper CTuK57.
- [8] N. P. Barnes, J. A. Williams, J. C. Barnes, and G. E. Lockard, “A self-injection locked, Q-switched, line-narrowed $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ laser,” *IEEE J. Quantum Electron.* QE-24, 1021 (1988).
- [9] K. W. Kangas, D. D. Lowenthal, and C. H. Muller III, “Single-longitudinal-mode, tunable, pulsed Ti:sapphire laser oscillator,” *Opt. Lett.* 14, 21 (1989).
- [10] D. K. Ko, G. Lim, S. H. Kim, B. H. Cha, and J. M. Lee, “Self-seeding in the dual-cavity-type pulsed Ti:sapphire laser oscillator,” *Opt. Lett.* 20, 710 (1995).

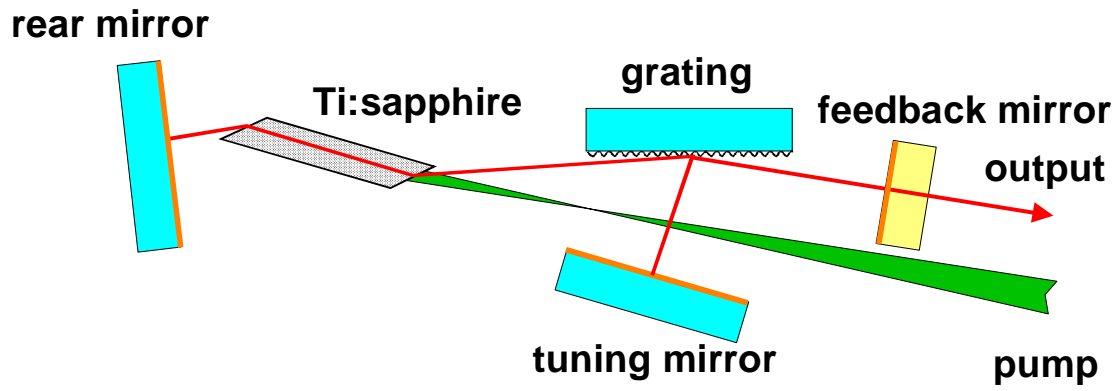


그림 1. Ti:sapphire 레이저의 self-seeding 공진기 구조.

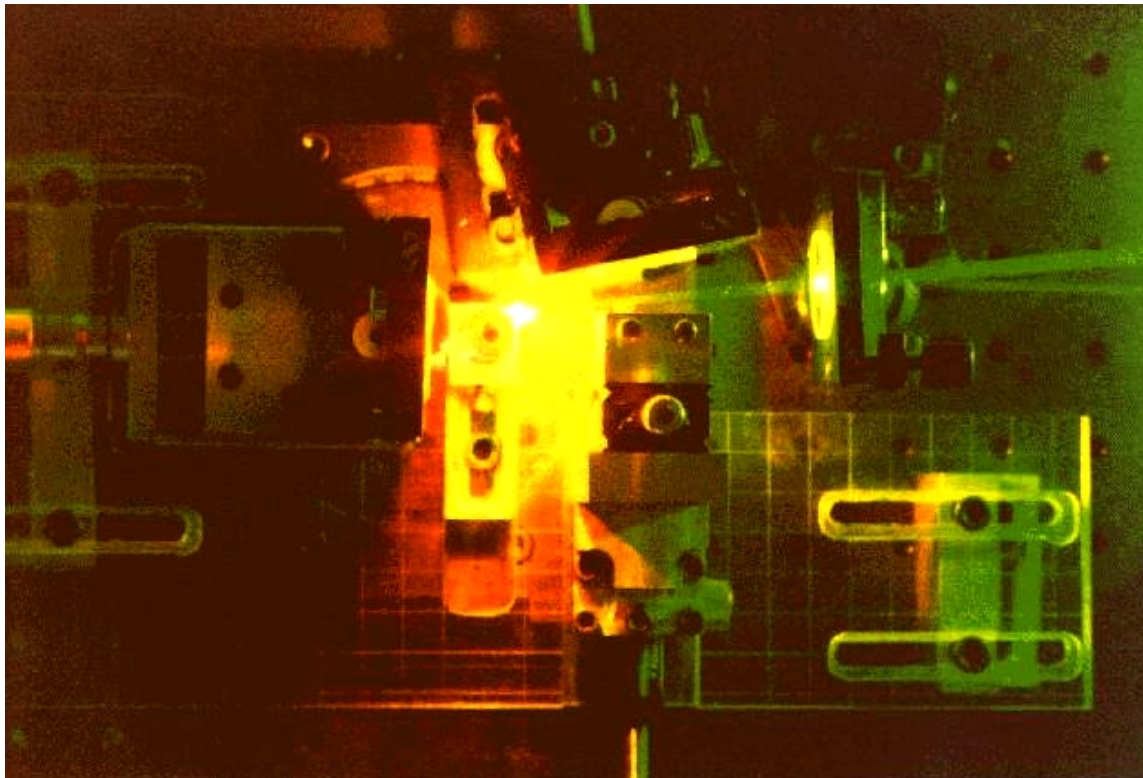


그림 2. Ti:sapphire 레이저의 self-seeding 발진기 모습.

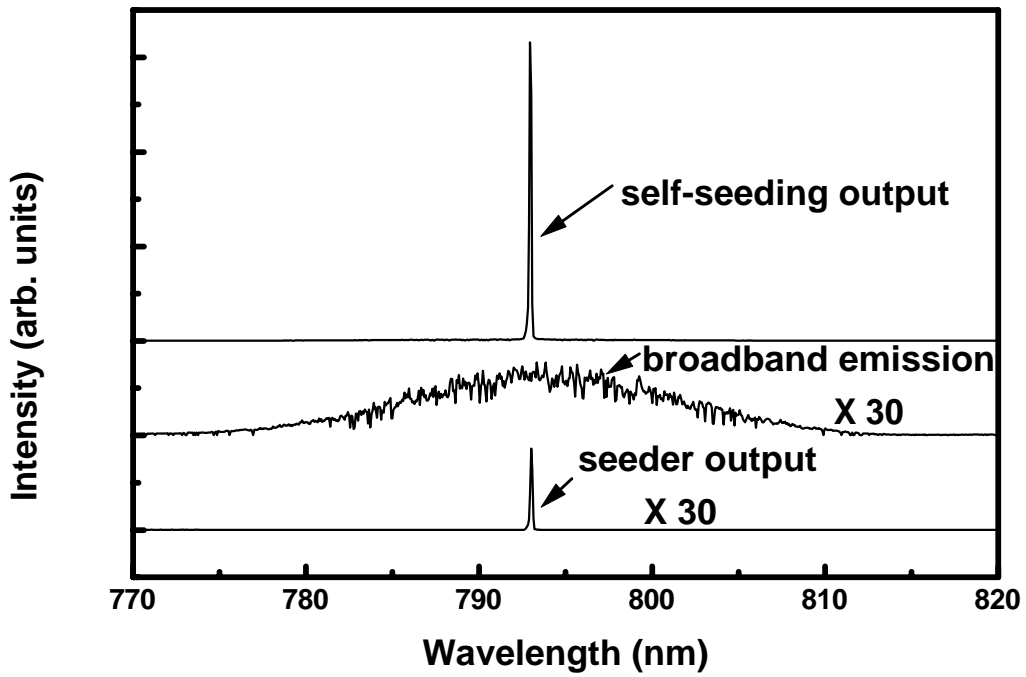


그림 3. Ti:sapphire 레이저의 seeder, broadband emission, self-seeding 출력 스펙트럼.

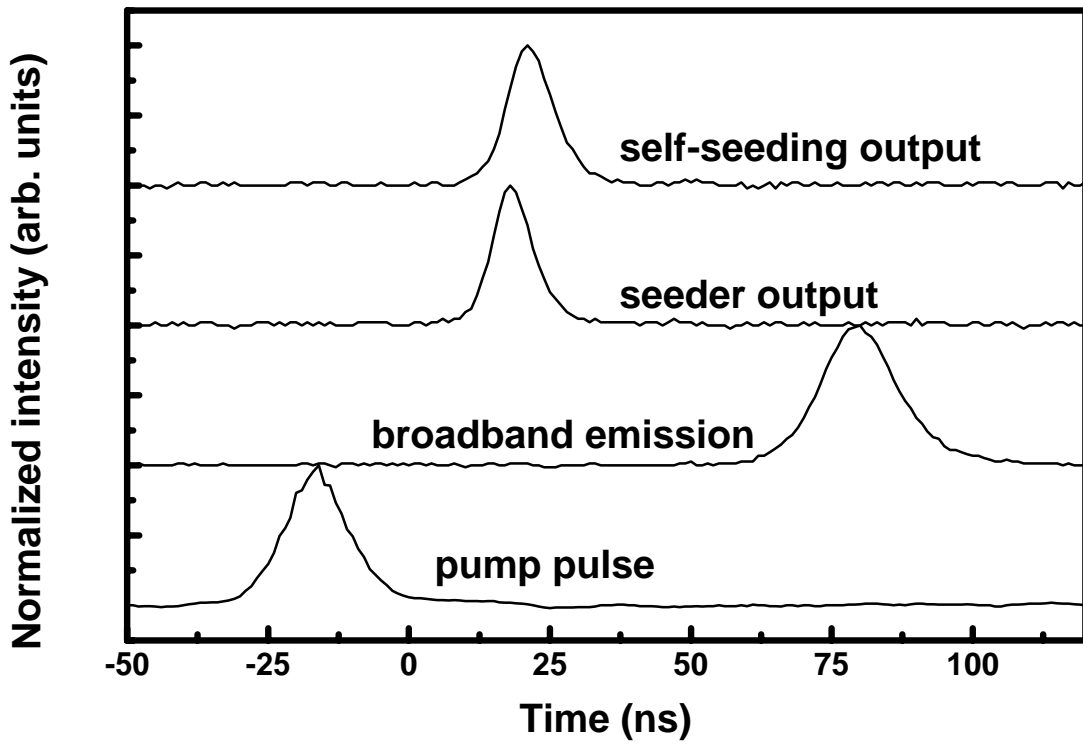


그림 4. Ti:sapphire 레이저의 seeder, broadband emission, self-seeding 출력에 대한 펄스발생시간 측정.

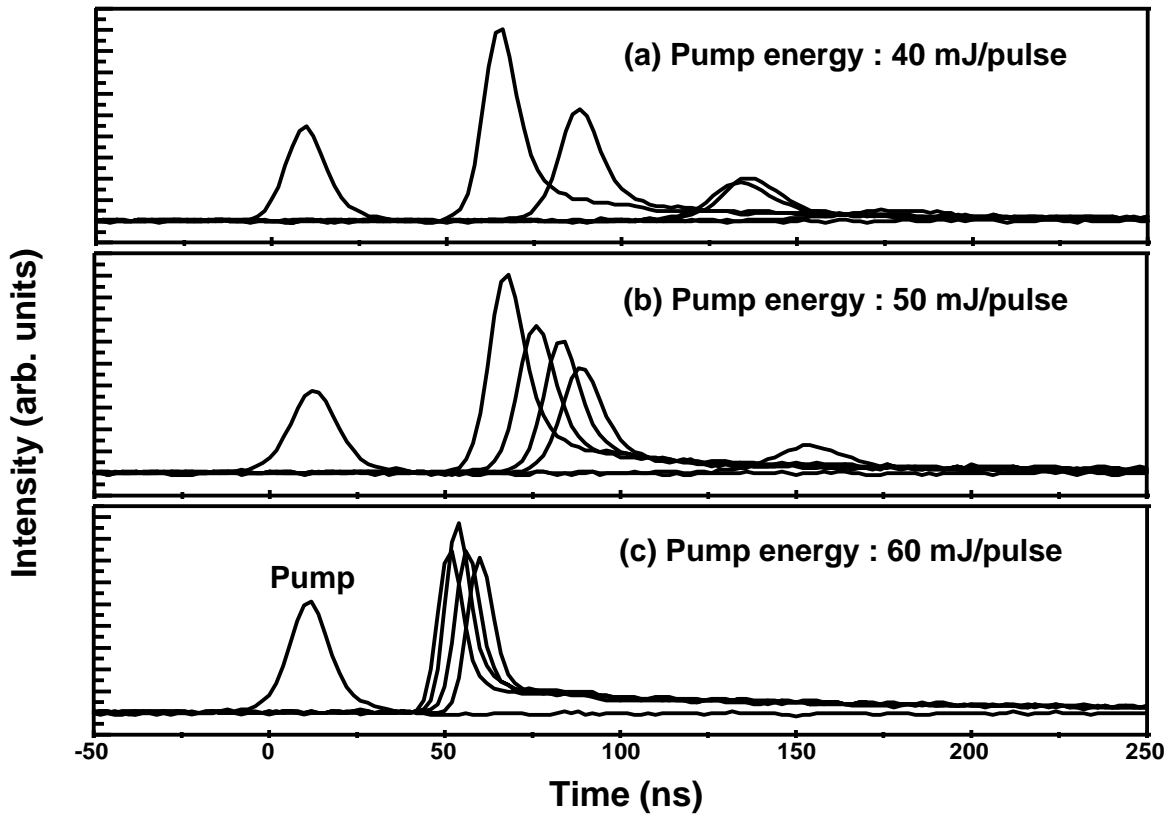


그림 5. Ti:sapphire 레이저에서 반사율 30 %일때의 self-seeding 출력 펄스파형.

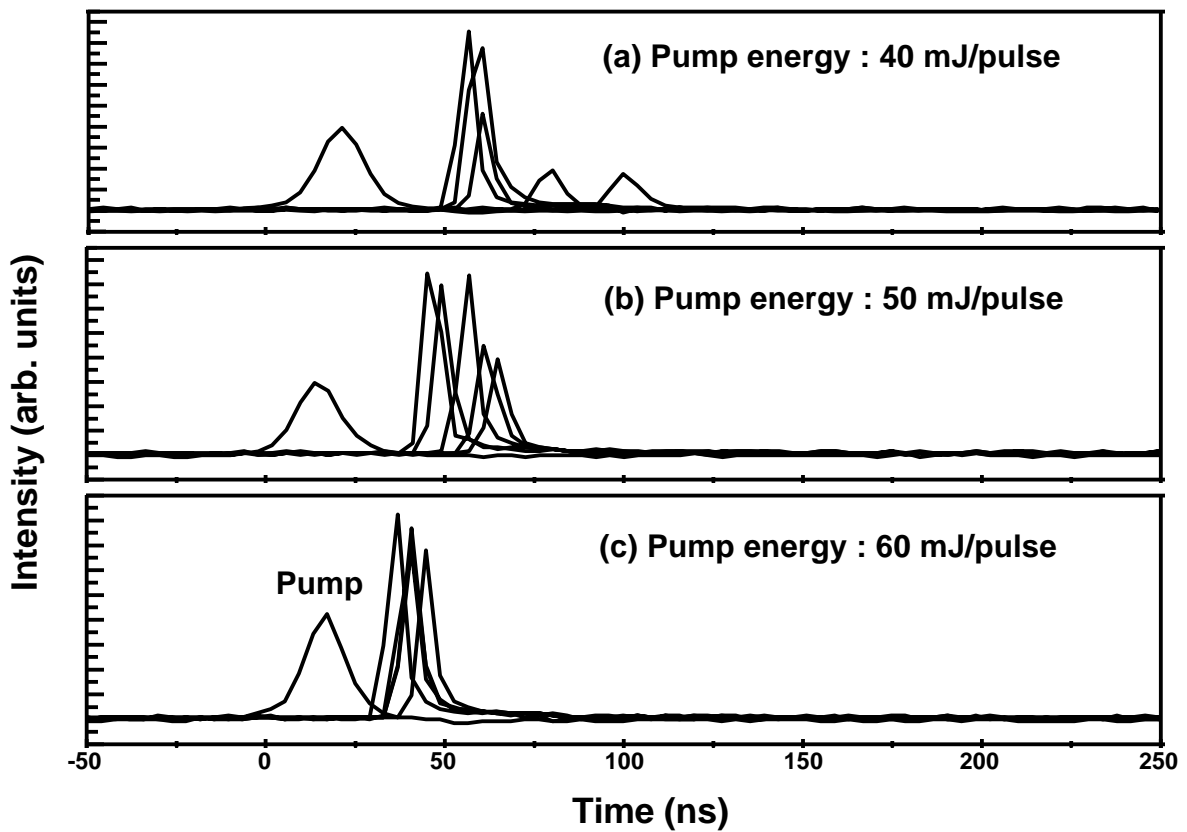


그림 6. Ti:sapphire 레이저에서 반사율 50 %일때의 self-seeding 출력 펄스파형.

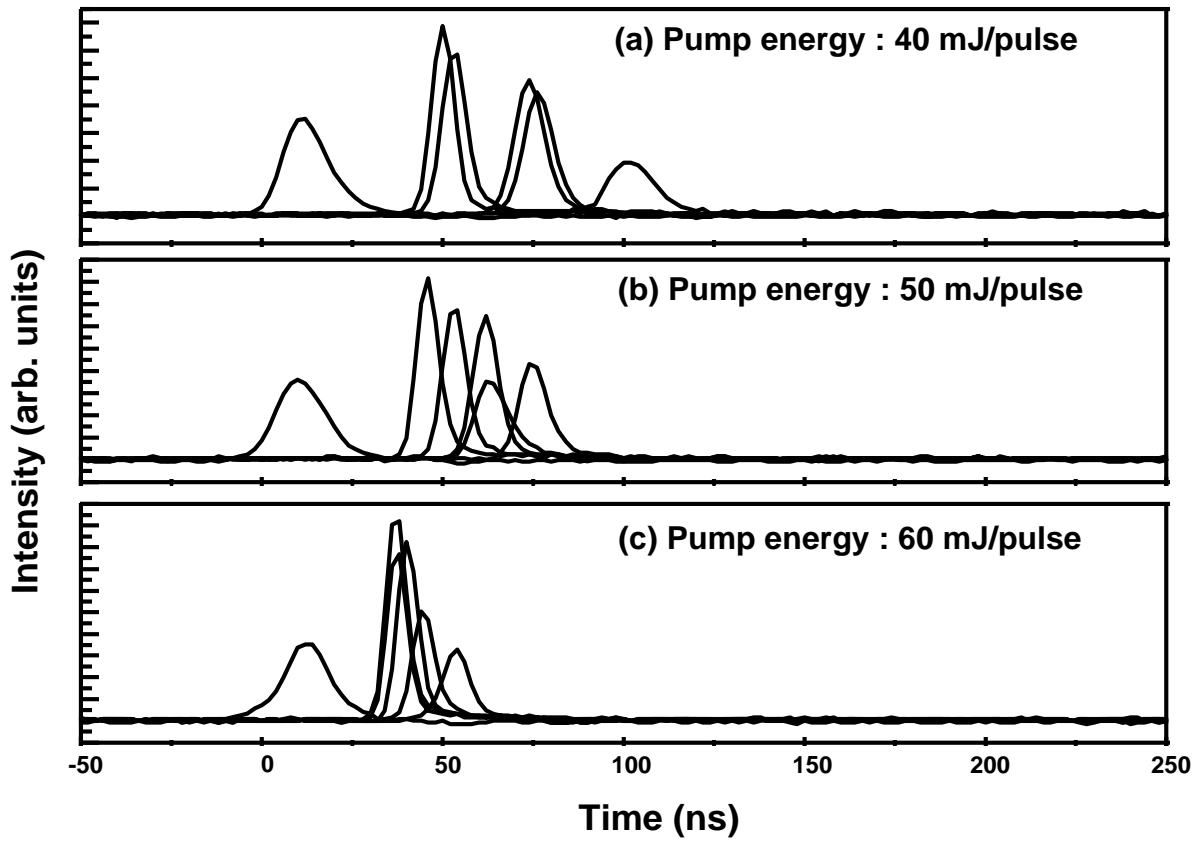


그림 7. Ti:sapphire 레이저에서 반사율 70 %일때의 self-seeding 출력 펄스파형.

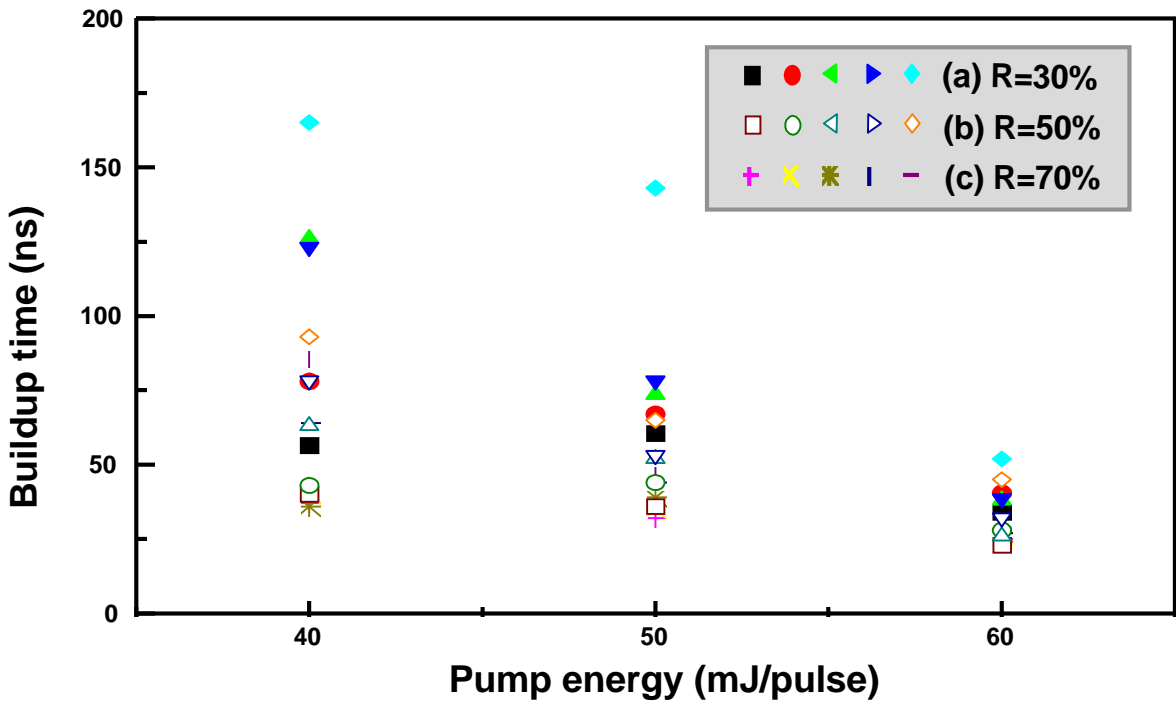


그림 8. 각각의 반사율에서 펌프 에너지의 변화에 따른 펄스발생시간.

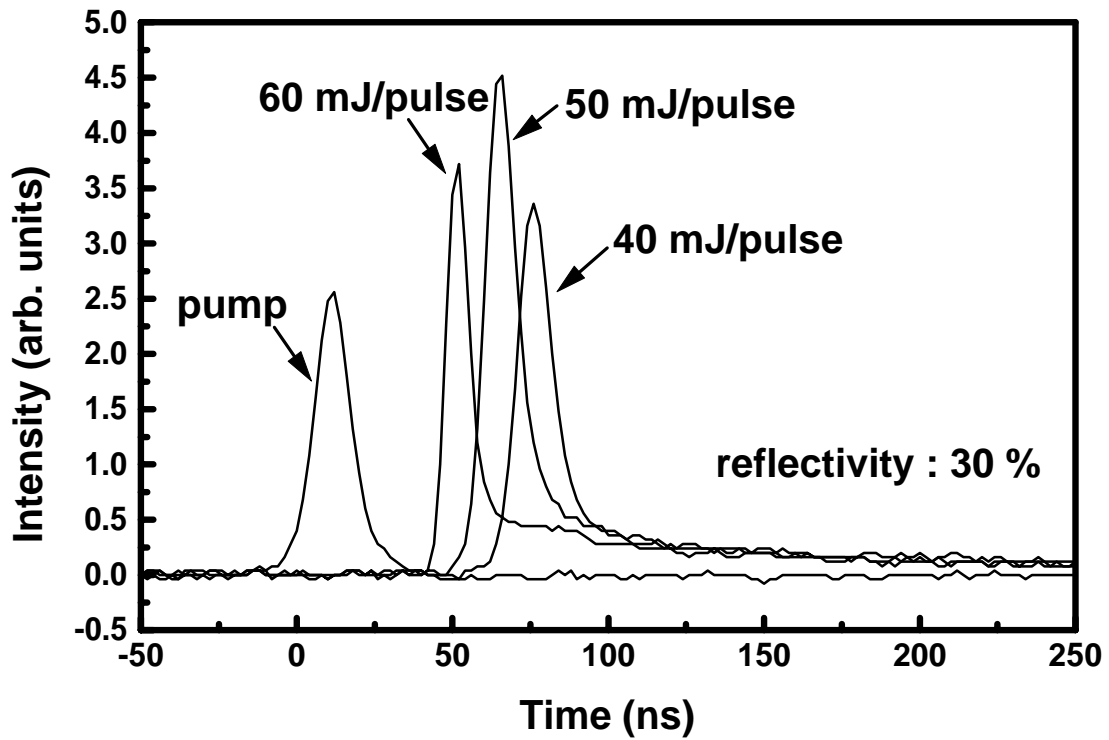


그림 9. Ti:sapphire 레이저에서 반사율 30%일때의 펌프 에너지에 따른 펄스파형.

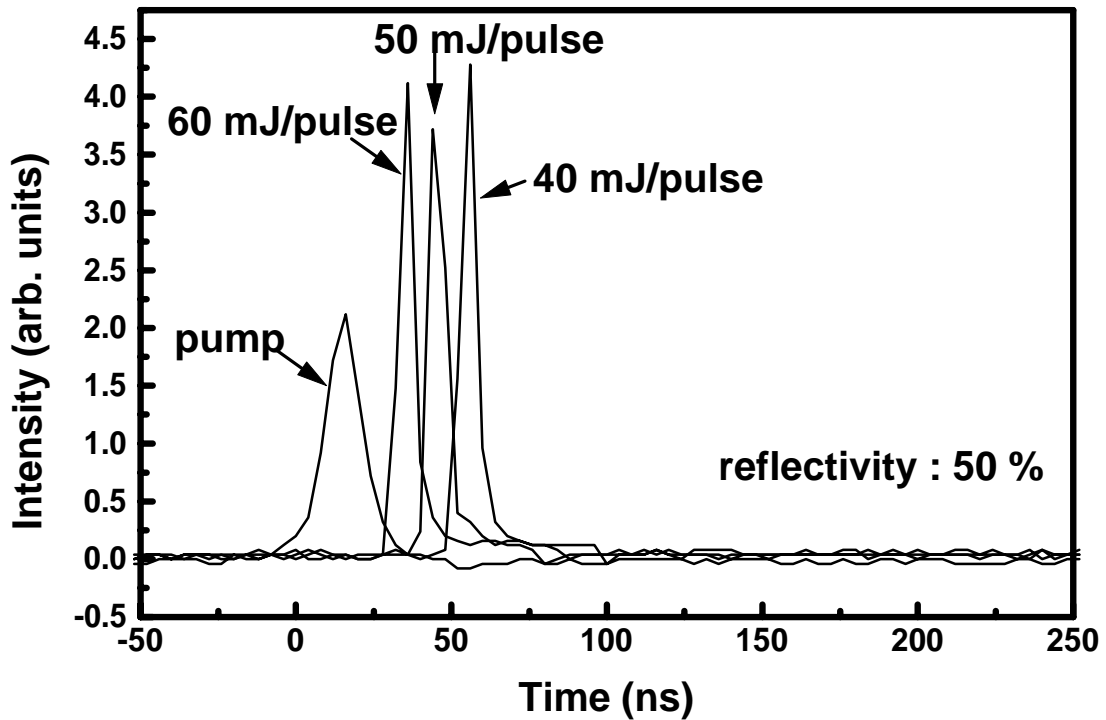


그림 10. Ti:sapphire 레이저에서 반사율 50%일때의 펌프 에너지에 따른 펄스파형.

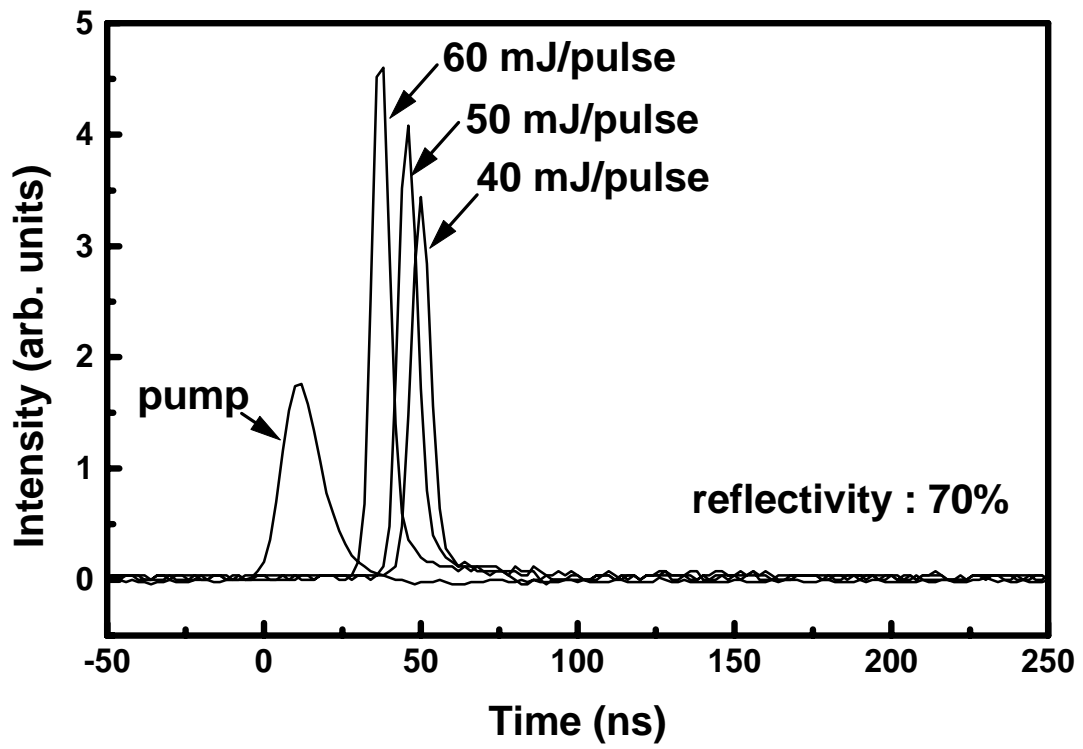


그림 11. Ti:sapphire 레이저에서 반사율 70%일때의 펌프 에너지에 따른 펄스파형.