

KHz 반복률에서의 Ti:sapphire 이득 스위칭 레이저 발진과 펨토초 처프펄스 재생 증폭

이용인 · 안영환 · 이상민[†]

아주대학교 에너지시스템학부

Ⓣ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산 5 번지

서민아 · 김대식

서울대학교 물리학과

Ⓣ 151-747 서울특별시 관악구 신림동 산 56-1 번지

(2006년 10월 10일 받음, 2006년 12월 22일 수정본 받음)

1kHz 반복률의 펨토초 펄스를 방출하는 안정된 Ti:sapphire 처프펄스 재생 증폭 시스템의 자체제작 및 최적화를 위해 시스템을 구성하는 각 요소들의 특성을 세부적으로 분석하였다. 사용된 증폭 공진기를 kHz 영역에서 반복률 변환 가능한 이득스위칭 레이저 구조로 변환하여 펄스 생성시간, 펄스출력에 따른 방출출력 특성 및 파괴여부, 펄스의 길이 및 파장가변 영역 등의 다양한 발진특성을 측정 분석하고, 이 결과를 기반으로 증폭 공진기를 설계 하였으며, 내부에 설치된 포캐셀의 작동시간, 증폭 시 펄스의 공진횟수 등을 고려하여 증폭단을 최적화하였다. 증폭기의 종자펄스로는 자체제작된 커 렌즈 모드잠금 Ti:sapphire 레이저로부터 방출되는 50fs 펄스가 사용되었다. 종자펄스는 3개의 거울로 구성된 재생 증폭공진기에 입사되기 전에 펄스늘림기를 통해 120ps로 확대되었으며, 증폭 후 펄스길이의 재압축을 통해 815nm 영역에서 85fs, 320μJ의 극초단 펄스를 방출하는 1kHz 처프펄스 재생 증폭기를 제작하였다.

주제어 : Ti:sapphire, Femtosecond laser, Gain switching, Regenerative amplification.

I 서 론

극초단 펄스 레이저는 1990 년대 제작 기술의 혁명을 겪으면서 많은 응용 분야에서 다양하게 사용되고 있다. 이를 이용하여 피코초(10^{-12} s)에서 펨토초(10^{-15} s)까지 달하는 짧은 시간 내에 일어나는 물질의 화학적, 동역학적 특성규명이 가능하며,^[1] 극초단 레이저 펄스의 높은 순간 출력과 에너지 밀도를 이용하여 미세구조물 제작,^[2] 레이저 절제,^[3] 테라헤르츠 전자기파^[4] 및 X-ray 생성,^[5] 다광자 화상진찰,^[6] 레이저 핵융합^[7] 등의 광범위한 응용 분야에서 주요광원으로 사용되고 있다. 일반적으로 극초단 펄스 레이저의 매질로 가장 널리 사용되는 Ti:sapphire는 1982년 Moulton^[8]에 의해 처음으로 연구된 넓은 방출 파장영역에서 비교적 높은 이득 특성을 보이는 레이저 매질이며, 모드 잠금 기술^[9]을 통해 상온에서 안정적인 극초단 펄스방출을 가능하게 한다. 하지만 공진기로부터 방출되는 펄스의 에너지는 nJ 영역에 제한되어 있으므로 그 에너지 범위와 응용 범위를 확장하기 위해서는 극초단 펄스 증폭기술에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

1985년 처음으로 제안되어 개발된 처프펄스 증폭(chirped pulse amplification)기술^[10]은 실험실 수준의 극초단 펄스 레이저 증폭기 제작을 가능하게 하였다. 극초단 레이저 펄스의 증폭시 증가된 첨두 출력에 의해 광학 소자들이 손상을 입는데, 이러한 문제를 해결하기 위한 처프 펄스 증폭법을 이용

하면 극초단 펄스가 가진 넓은 파장 대역폭의 파장에 따른 분산을 이용하여 펄스의 길이를 수백피코초 혹은 나노초 영역까지 늘린 후 증폭, 재압축 과정을 통해 고출력 극초단 펄스 방출이 가능하다. 증폭 단계에서는 일반적으로 다중 경로 증폭^[11,12]와 재생 증폭^[13-15]이 사용되고 있으며, 다중 경로 증폭법은 증폭하고자 하는 펄스가 증폭 매질을 통과하는 횟수에 따라 기하학적인 각도를 변화시켜 경로를 확보하는 방법으로 레이저 펄스의 에너지를 증폭시킨다. 이 때 증폭매질에서 발생하는 고차 분산성분을 고려하여 보상해주면 50fs 미만의 짧은 펄스로 재압축이 가능하다.^[16] 하지만 증폭기 구조상 증폭기의 증폭 효율을 높이기 위해서 증폭기의 안정성 확보와 효과적인 왕복 횟수를 결정 및 민감한 세부조정이 필요하므로 증폭 최적조건을 찾는 데 다소 어려움을 갖는다. 이에 비해 재생 증폭에서는 모드 잠금된 레이저의 광 신호가 전기광학 소자와 전기적으로 동기화되어 구동함으로써 레이저 펄스의 효율적인 증폭을 유도한다. 전기광학 소자는 입사되는 레이저 펄스의 편광상태를 조절하여, 증폭기 내에 레이저 펄스가 입사 후 증폭되어 출사되는 과정을 제어한다. 이를 통해 증폭 공진기 내에 입사된 펄스의 왕복횟수를 쉽게 조절할 수 있으며, 증폭 매질에서 종자 펄스(seed pulse)에 효과적인 펄스레이저 에너지의 전이조절이 가능하다. 또한, 증폭 공진기의 구조가 자유가동(free running) 일 경우 일반 레이저 공진기와 유사한 구조이므로 펄스 빔의 안정적인 동작을 쉽게 최적화 할 수 있는 장점을 지니고 있다.

제품화된 1kHz 펨토초 Ti:sapphire 재생증폭기는 이미광범

[†] E-mail: rotermun@ajou.ac.kr

위한 응용분야에서 널리 쓰이고는 있지만, 자체 제작된 증폭 시스템의 각 구성 요소가 지닌 세부적인 특성분석 및 시스템 전반에 대한 보고는 아직까지 국내에서 체계적으로 이루어지지 않았으므로, 본 연구에서는 이를 자세히 다루고자 한다. 일차적으로 커렌스 모드 잠금된(Kerr lens mode-locked) Ti:sapphire 레이저 공진기를 제작하고, 방출되는 펄스의 특성을 분석하였다. 초저펄스 증폭에 사용될 재생 증폭 공진기 제작을 위해 증폭매질의 이득 스위칭^[17] 특성을 0.8kHz에서 2.0kHz 반복률 영역에서 측정, 분석하였다. 이득 스위칭 및 레이저 펄스 생성시간(build-up time), 방출 펄스의 길이, 출력 특성 등을 알아보고, 복굴절 필터를 사용하여 1kHz 반복률에서 파장변환이 가능한 협대역(narrowband) 펄스의 특성^[18]을 알아보았다. 이러한 특성을 기반으로 펄스의 동기화, 포켈셀(Pockel's cell) 동작시간 등을 최적화하여 재생증폭기의 증폭단을 제작하였다. 펄스 늘림기(stretcher)와 펄스압축기(compressor), 그리고 증폭단을 통해 증폭된 극초단 레이저 펄스를 자체 상관관계와 스펙트로미터를 이용해 분석하였다.

본 논문에서는 이득 스위칭과 재생 증폭기의 원리, 재생 증폭기의 설계 및 제작, 종자레이저(seed laser)로 사용된 Ti:sapphire 레이저의 출력특성, 이득 스위칭과 재생 증폭기의 동작 및 출력등 증폭기 제작에 고려해야 할 주요 특성에 대해 자세히 논의하고자 한다.

III. 이득 스위칭과 재생 증폭기 원리

재생 증폭법을 이용하면 이득이 낮은 매질에서도 매질이 지닌 포화이득 영역까지 효율적으로 에너지를 증폭시킬 수 있으므로 에너지 추출효율을 높이고, 고이득의 안정된 펄스를 얻어 낼 수 있다. 편광을 제어할 수 있는 소자인 포켈셀을 이용하여 종자 펄스를 제어하여 크게 4 개의 단계 거쳐 재생 증폭이 이루어진다.^[15] 첫째, 종자 펄스가 포켈셀에 의해 선택된 한 개의 펄스가 증폭공진기 내로 주입되고, 둘째, 이와 동시에 증폭 공진기의 작동은 공진기내의 포켈셀 작동시간을 주입된 펄스와 적절히 동기화시켜 Q-스위칭 방법으로 변환한다. 셋째, 종자 펄스를 공진기 내에서 증폭매질을 왕복 운동하게 함으로써 주입된 펄스가 펌프 펄스의 이득스위칭에 의한 이득 곡선을 따라 에너지가 전이되도록 한다. 마지막으로 이득 곡선의 포화 상태에서 증폭된 펄스를 cavity dumping을 통하여 공진기 밖으로 뽑아낸다. 이 때 재생 증폭기의 에너지 증폭 과정은 포화모델(saturation model)에 의해 입사에너지 밀도 J_i 와 출력 에너지 밀도 J_{out} 사이의 다음과 같은 관계로 기술된다.^[11]

$$J_{out} = J_{sat} \ln G \left(\left[\exp(J_i/J_{sat}) - 1 \right] + 1 \right) \quad (1)$$

여기서 J_{sat} 는 매질의 포화 에너지 밀도이고 G 는 총 출력 이득을 나타내며 총 출력 이득과 소신호 이득 계수(small signal amplification coefficient) g 는 다음과 같은 지수 함수

관계를 가진다.^[19]

$$G = \exp(g) \quad (2)$$

$$g = \sigma \int_0^L \Delta n(z) dz \quad (3)$$

이 때 σ 는 유도 방출 단면적이고 $\Delta n(z)$ 은 매질의 종방향에 따른 밀도 반전의 크기이다. $J_i \ll J_{sat}$ 인 경우 즉, 입사되는 에너지 밀도가 포화 에너지 밀도에 비해 낮으면 식 (1)은 선형 함수($J_{out} = GJ_i$)로 표현 가능하므로 출력되는 에너지 밀도는 소신호 이득 계수에 대해 지수 함수적으로 증가함을 알 수 있다. 하지만 입사 에너지 밀도가 포화 에너지 밀도에 이르게 되면($J_i \approx J_{sat}$) 이득 매질의 종방향 의존이 없어 지므로 소신호 이득 계수는 단순히 매질 길이 전체에 걸쳐서 평균적인 값을 나타내게 된다. 따라서 펄스의 에너지가 재생 증폭됨에 따라 소신호 이득 계수는

$$g' = g - (J_{out} - J_i)/J_{sat} \quad (4)$$

의 식과 같이 감소하게 되어 전체 증폭 이득이 포화 에너지 밀도 근처에서 이득 포화가 일어나므로 재생 증폭에 의해 증폭되는 최대 에너지가 결정된다. 따라서 이득 포화 효과를 완화시키기 위해서는 입사되는 빔의 크기를 적절히 조절하여 에너지 밀도를 줄여주는 것이 필요하다. 재생 증폭단을 통해 최대 펄스 에너지를 얻기 위해서는 이득 포화가 이루어진 시점에 증폭된 펄스를 cavity dumping시켜야 한다. 그런데 종자 펄스는 포켈셀에 의해제어되므로 효율적인 재생 증폭을 이루기 위해서는 이득 스위칭으로 발생하는 펄스의 생성시간을 고려하여 재생 증폭기 제작에 이를 적용할 필요가 있다.

Eggleston et al.^[20]에 의하면 레이저가 발전 문턱값에 가까이 펌핑될 때까지 주로 자발 방출만 일어나므로 상위 레이저 준위의 에너지가 출력 펄스로 전환되지 않는다. 또한 발전 문턱값을 넘어서면 주로 유도방출에 의해 출력 펄스가 결정되므로 자발 방출은 무시할 수 있다. 이 때 펄스펄스가 이득 매질에서의 레이저 펄스생성시간과 비교하여 짧을 경우에는 Q-스위칭 레이저와 동일하게 취급 할 수 있다.^[17] 펄스의 시작 시점을 최대 광자수의 5% 이내로 정의하면 펄스 생성시간 Δt 는 다음과 같이 표현된다.^[21]

$$\Delta t = t_R \frac{\ln(n_{max}/20n_i)}{2g_0d + \ln(R) - L} \quad (5)$$

여기서 t_R 는 공진기의 왕복시간, n_i 은 공진기 모드를 따라 출력되는 증폭된 자발방출을 고려하여 계산된 최초광자수, d 는 이득 매질의 길이 그리고 g_0 는 펌프 빔에 의한 소신호 이득 계수이다. 위의 식 (5)를 살펴보면 g_0 이외의 다른 항들은 매질의 특성과 공진기 구성으로 정해지는 값이므로 build-up

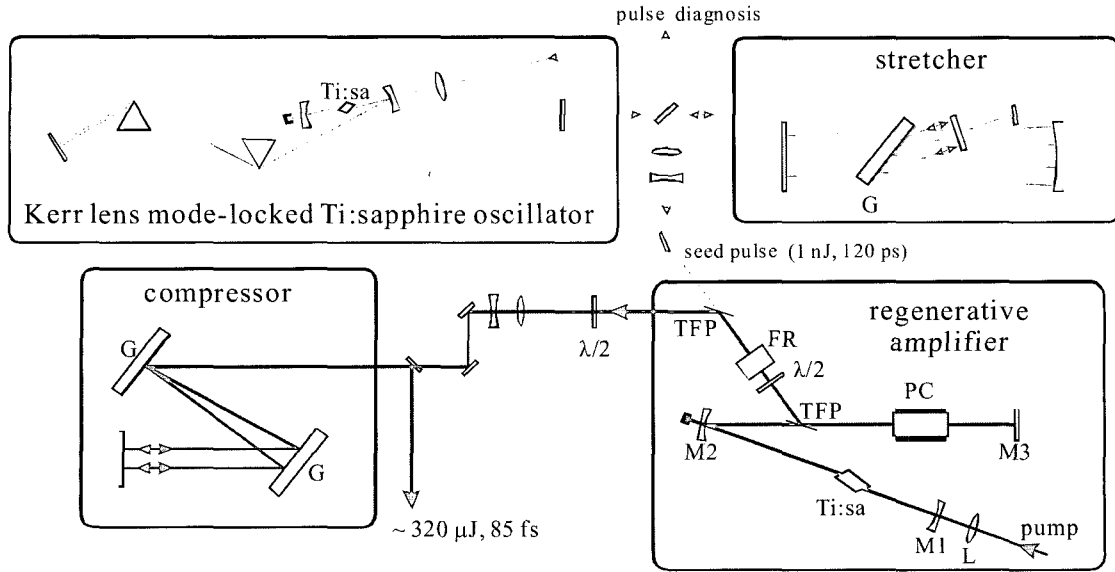


그림 1. 펄스초 초펄스 재생 증폭 시스템의 구성도.

Ti:sa: 브루스터각으로 연마된 Ti:sapphire 결정, G: 회절격자(groove=1200line/mm), TFP: 박막 편광자, FR: 패러데이 회전자, λ/2: 반파장 위상지연자, M1: 750~850nm 영역에서 HR-코팅된 오목거울 (f=250mm), M2: 750~850nm 영역에서 HR-코팅된 오목거울 (f=500mm), M3: 750~850nm 영역에서 HR-코팅된 거울, PC: 포켈셀

시간은 g_0 와 함수관계임을 알 수 있다. 이 때 펄스가 매질을 1회 통과하여 얻는 이득의 표현은 다음과 같이 표현된다.

$$\ln G_0 = g_0 d = K P_{in} \quad (6)$$

$$K = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4}{I_s A} \quad (7)$$

여기서 P_{in} 는 입사 펄스 펄스의 출력, η_1 은 양자효율, η_2 는 입사출력에 대한 이득 매질의 흡수효율, η_3 은 펄스 광원으로 부터 이득 매질로의 전이효율, η_4 는 이득 매질에 의해 펄스 광이 실제 흡수되는 비율로 매질의 특성과 온도에 기인하는 요소이고, A 는 매질의 단면적이다. 본 연구에서 사용된 이득 매질인 Ti:sapphire의 경우, 펄스율 W_p (pumping rate)와 자연방출 소멸시간 τ_f (spontaneous decay time)의 관계가 $W_p \ll \frac{1}{\tau_f}$, $\gamma=1$ 인 4 준위 이득 매질로 근사할 수 있으므로 포화 세기 I_{sat} 는

$$I_{sat} = \left(W_p + \frac{1}{\tau_f} \right) \frac{h\nu}{\gamma\sigma_{21}} \approx \frac{h\nu}{\sigma_{21}\tau_f} \quad (8)$$

으로 표현될 수 있다. 따라서 I_{sat} 는 매질의 특성으로 결정되는 값으로 취급할 수 있으므로 펄스 계수 K (pumping coefficient)는 상수로 간주할 수 있다. 또한 식 (6)은 4 준위 이득매질에서 다음과 같은 함수관계를 갖게 된다.

$$g_0 d \propto P_{in} \quad (9)$$

식 (5)과 식 (9)를 고려하면 방출되는 펄스는 펌프빔의 출력이 증가하면 펄스생성시간이 줄어드는 함수 관계가 성립함을 알 수 있다. 이 외에 재생 증폭기의 출력특성은 레이저 매질의 이득대역폭에 영향을 받는다. 본 연구에 사용된 Ti:sapphire 결정은 이득 중심이 795nm 로 660~1050nm 에 이르는 넓은 방출영역^[22]을 가지고 있으므로 재생증폭 시 gain-narrowing 현상이 발생할 수 있다. 이 현상은 특정한 대역폭을 갖는 펄스가 제한된 이득대역폭을 갖는 증폭 매질에 입사하여 증폭될 때 이득 대역폭에 의한 증폭 펄스의 대역폭이 감소되는 것을 말한다. 증폭 매질의 이득대역폭이 넓다고 하더라도 증폭이득이 파장별로 다른 곡선을 가지면 이득 곡선의 최대 이득 파장 근처에서 가장 큰 이득을 얻고 이득 곡선의 가장자리는 상대적으로 낮은 이득을 얻기 때문에 재생 증폭기와 같이 반복적으로 증폭 매질을 통과하여 증폭하는 경우 이러한 현상이 심화되어 증폭된 펄스의 대역폭이 줄어들게 된다. 또한 이득 곡선의 중심이 증폭 펄스의 중심과 일치하지 않으면 이득 곡선을 중심으로 증폭 펄스의 중심이 이동하게 된다. 따라서 위의 이러한 주요 특성을 고려한 재생 증폭 시스템의 최적화 작업이 요구된다.

III. 재생 증폭기 설계 및 제작

초펄스 증폭법을 이용한 펄스초 펄스 재생 증폭 시스템은 그림 1과 같이 크게 4 부분으로 구성되어 있다. nJ 영역 에너지를 지닌 펄스초 펄스를 방출하는 커 렌즈 모드 잠금된 공진기와 극초단 펄스에 양분산 효과를 유도하여 펄스의 길이를 늘리는 펄스 늘림기, 늘어난 펄스를 반복적으로 증폭 매질에 입사시켜 에너지를 높이는 재생 증폭단, 그리고 이렇

게 증폭된 펄스를 다시 본래의 펄스길이 범위로 재압축 시키는 펄스압축기가 주요 구성요소이다.

레이저 공진기는 3mm Ti:sapphire결정을 레이저 매질로 사용하여 X자 형태로 제작되었으며, 펌프 레이저로는 연속발진형 2차 조화파 Nd:YVO₄ 레이저(Spectra-Physics, Millennium Pro 5i)를 사용하였다. 공진기내에 프리즘 쌍을 설치하여 레이저 매질에서 발생하는 분산을 보상하여 펄초 초펄스 방출이 가능하였다. 안정된 모드 잠금 시 공진기로부터 방출되는 펄스의 평균 출력은 펌프 레이저의 출력이 3.5 W 일 때 400 mW이며, 이 때 반복률은 92 MHz였다. 측정된 펄스의 스펙트럼 반치폭은 28nm, Type-I BBO 자체 상관계를 제작하여 측정된 펄스의 길이는 가우스 형태로 가정하여 환산하였을 때 50 fs였다. 레이저의 중심파장은 820nm이며, 770nm와 840nm 사이에서 파장변환이 가능하였다. 측정된 펄스의 길이가 푸리에 변환 한계를 다소 넘어서는데, 이는 레이저 매질 및 공진기내의 다른 광학부품에 의해 발생하는 고차 분산 성분이 프리즘 쌍 만으로 완벽하게 보상되지 않았기 때문이다. 그림 1과 같이 공진기로부터 방출된 50fs의 펄스의 대부분은 단일 회절격자(1,200 line/mm)로 제작된 펄스 늘림기에서 양분산 효과에 의해 120 ps 로 늘어 재생 증폭기의 종자 펄스로 사용되었다. 이 때 방출된 펄스 에너지는 회절격자 및 거울 반사에 따른 손실에 의해 ~1nJ이며, 이는 전체 펄스 늘림기의 투과효율 40% 에 해당된다. 증폭 시 증폭 매질 내에서의 원활한 모드 정합(mode matching)을 위해 증폭단 앞쪽에 볼록 렌즈와 오목 렌즈로 구성된 시준기(collimator)를 구성하였다. 펄스 늘림기로부터 방출된 p 편광 펄스를 재생 증폭 공진기 안으로 주입시키기 위해서는 빔의 편광을 s편광으로 바꾸어야 한다. 따라서 펄스를 패러데이 회전자(Faraday rotator)와 λ/2 위상 지연판(half wave plate)에 통과시켜 각각 π/4의 위상 지연을 추가하여 s편광으로 편광상태를 변환하였다. 이 펄스는 박막 편광자(thin film polarizer)를 통해 포켈셀로 입사되고 포켈셀 작동에 의해 p편광 상태로 펄스를 변환해 공진기 내부에 가두어 에너지 증폭과정을 거치게 되었다. 본 연구에 사용된 포켈셀(Laser Metrics, 5046SC)은 700~900nm 반사 방지 코팅된 DKDP를 매질로 사용하고 10mm 의 유효 구경을 갖는 포켈셀 이다. 종자 펄스를 효과적으로 증폭시키기 위해서는 공진기와 포켈셀의 시간적 동기화를 통해 증폭 시키고자 하는 시간에 한 개의 펄스만 선택해 반복적으로 공진기 내에서 증폭을 이룬 다음 펄스의 에너지가 포화되었을 때 cavity dumping을 통해 증폭된 펄스를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 종자 레이저로부터 방출되는 약 10.9ns의 펄스 간격과 3ns의 포켈셀 상승시간을 고려하여 공진기를 설계하였다. 초점거리가 각각 250 mm, 500mm를 가지는 오목거울(Layertec)과 전반사 거울(CVI)등 3개의 거울을 이용해 증폭 공진기를 구성하였으며, 길이 7mm의 양면이 브루스터 각으로 연마된 타원 막대형 Ti:sapphire 결정을 증폭매질로 사용하였다. 증폭 시 매질 지지대의 온도는 냉각순환기를 이용하여 14도로 유지하였다. 증폭 후 공진기로부터 뽑아낸 펄스는

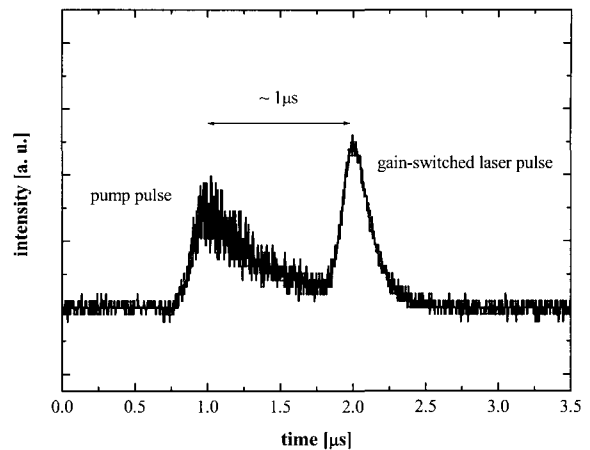


그림 2. 이득 스위칭 발전 시 펌프펄스와 출력펄스간의 시간차. (이 시간차는 레이저 펄스의 생성시간을 의미한다.)

펄스 늘림기에 사용된 동일사향의 회절격자 두 개로 구성된 펄스 압축기를 통해 100 fs 미만의 펄스로 재압축되었다.

IV. 이득 스위칭과 재생 증폭기 동작 및 출력 특성

안정적인 펄초 초펄스 증폭 시스템 제작을 위하여 우선 증폭단에서 사용될 공진기를 이득 스위칭 작동구조로 변환하여 발전시키고, 다양한 특성을 측정하였다. 이득 스위칭 레이저로 변환 시 그림 1의 재생 증폭 공진기 구조를 동일하게 유지하되 단지 전반사 거울을 10% 투과 출력거울(Layertec)로 교환하여 자유가동 가능하게 구성하였다. 이 때 출력거울의 투과율은 차후 증폭 공진기 내부에 설치될 박막 편광자와 포켈셀의 손실을 고려하여 선택하였다.

그림 2은 1 kHz의 반복률에서 흡수 펄스출력이 2.5W 일 때 이득 스위칭 레이저로 변환한 공진기로부터 방출되는 펄스 펄스와 출력 펄스간의 시간차를 보여주며, 이것은 초고속 광신호 검출기(EOT, ET-2030, 상승시간: 300ps)와 500MHz 오실로스코프를 이용하여 측정된 것이다. 이처럼 이득 스위칭 동작에 의해 발전되는 레이저는 펄스빔이 입사한 뒤 일정한 시간 뒤에 유도 방출되는 펄스 생성시간의 전형적인 특성을 보여준다. 펄스 레이저의 반복률을 0.8 ~ 2.0kHz 사이에서 변환하여 흡수펄스출력에 따른 펄스 생성시간의 변화를 측정해보면 그림 3와 같은 특성을 관찰할 수 있다.

이득 스위칭 동작에서 펄스 생성시간과 펄스의 길이에 대한 정보는 재생 증폭기 제작시 최적화 작업을 통해 공진기 내부 분산, 증폭에 의한 스펙트럼의 좁혀짐과 왜곡현상의 요인인 왕복횟수를 줄일 수 있으며, 또한 적은 왕복횟수를 통해 높은 에너지 방출이 가능하므로 주요한 변수로 작용한다. 그림 4 에서와 같이 이득 스위칭 동작 시 펄스 생성시간은 반복률 증가에 따라 증가함을 볼 수 있으며, 흡수 펄스출력이 증가함에 따라 거의 일정한 값에 도달함을 관찰하였다. 한편으로 레이저 발전문턱 부근으로 펄스레이저의 출력이

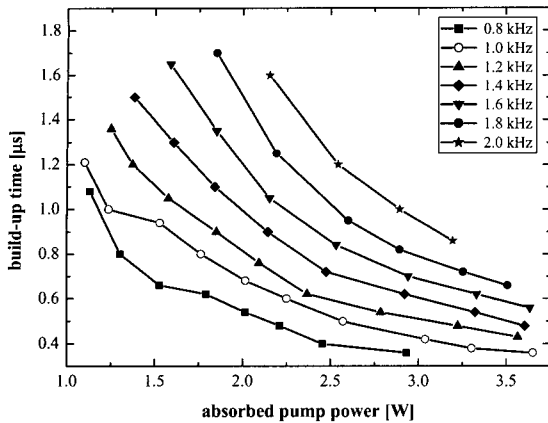


그림 3. 반복률 0.8-2 kHz 영역에서 이득스위칭 발진 시 흡수펌프 출력에 따른 레이저 펄스의 생성시간.

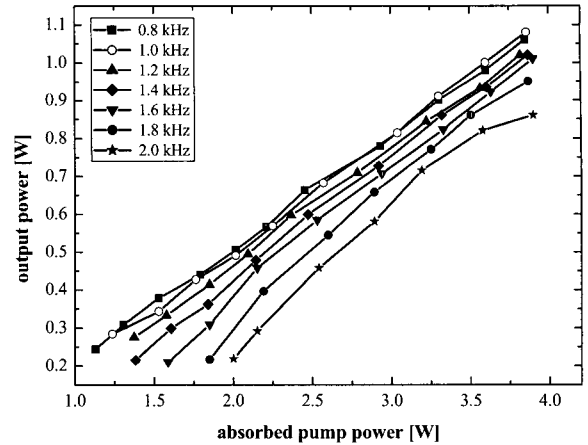


그림 5. 반복률 0.8-2 kHz 영역에서 이득 스위칭 발진 시 흡수 펌프 출력에 따른 출력.

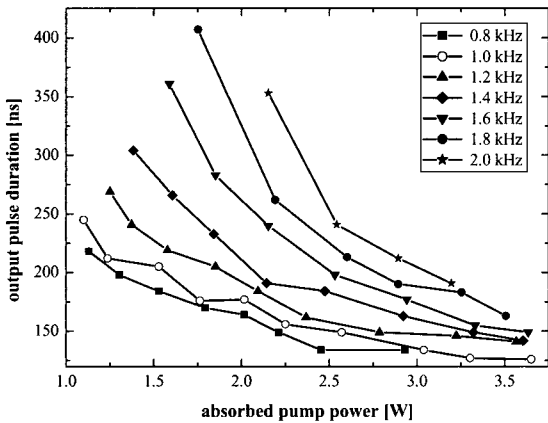


그림 4. 반복률 0.8-2 kHz 영역에서 이득 스위칭 발진 시 흡수 펌프 출력에 따른 레이저 펄스의 길이.

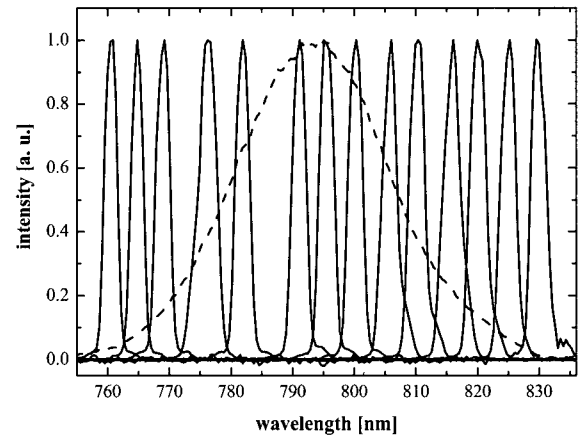


그림 6. 복굴절 필터를 이용한 이득 스위칭 레이저의 파장가변 특성.

감소함에 따라 펄스생성시간은 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 이러한 펄스 생성시간 변화의 결과는 앞서 제시한 이론적 고찰과 일치하며, 이를 통해 이해할 수 있다. 즉, Ti:sapphire 형광 수명 시간이 3.2μs 로 펌프 레이저의 펄스 폭 300ns 보다 상대적으로 크기 때문에 (5) 식에 의한 이득스위칭 발진에 대한 근사가 잘 성립하므로 펄스 생성시간이 펌프레이저의 입사 출력의 증가에 감소하는 함수 관계를 예측할 수 있다. 이와 같이 측정된 값을 통해 3.5W 이상의 흡수펌프출력을 요구하는 1 kHz 재생 증폭기의 경우 400ns미만의 펄스 생성시간이 소요됨을 예측할 수 있다.

그림 4는 이득 스위칭 동작에 의해 방출되는 레이저 펄스 길이의 변화를 보여준다. 펄스길이는 펌프 레이저의 출력 커짐에 따라 1kHz 의 반복률에서 220ns 에서 150ns 이하로 감소하는 경향을 보여 주는데, 이는 이득 스위칭에 의해 쉽게 150ns 정도의 펄스레이저 작동이 가능함을 보여준다. 그림 5는 10% 투과율을 지닌 출력거울을 사용했을 때 반복률 변화에 따른 레이저 출력의 측정값을 보여준다. 이 때 측정된 흡수 펌프출력에 대한 레이저 기술기 효율(slope effici-

ency)은 반복률에 따라 20-23% 사이의 값을 얻었으며, 2kHz 일 경우에는 고반복률에 의한 매질내에서 발생하는 열렌즈 효과에 의해 출력이 다소 포화되는 현상을 관찰하였다.

1kHz 영역의 광대역 파장가변 이득 스위칭 발진을 위해 공진기 내에 복굴절 필터를 브루스터각으로 삽입하고, 그 조절을 통해 방출되는 펄스의 파장변환을 시도하였다. 복굴절 필터를 공진기 내부에 설치하여 스펙트럼 반치폭 24nm의 초기 펄스를 반치폭 1~2nm를 갖는 협대역(narrow-band) 펄스로 변환하였으며, 760~830nm 사이에서 파장조절이 가능하였다(그림 6). 이 때 파장가변 영역은 공진기를 구성하는 거울의 코팅에 의해 제한되었다. 측정된 레이저의 출력은 Ti:sapphire 이득값이 가장 큰 790nm 근처에서 가장 높은 값을 보였다. 그림 7은 흡수 펌프출력이 ~1.7 W일 때 파장가변 영역에서 측정된 파장에 따른 출력을 보여준다. 레이저 펄스길이는 펌프출력의 증가에 따라 150ns 미만까지 하향조절이 가능하였다. 이로써 본 연구에서 제작된 이득스위칭 Ti:sapphire 레이저는 독립적인 협대역 파장가변 나노초 레이저로서 다양한 응용연구에 사용이 가능함을 제시하였다.

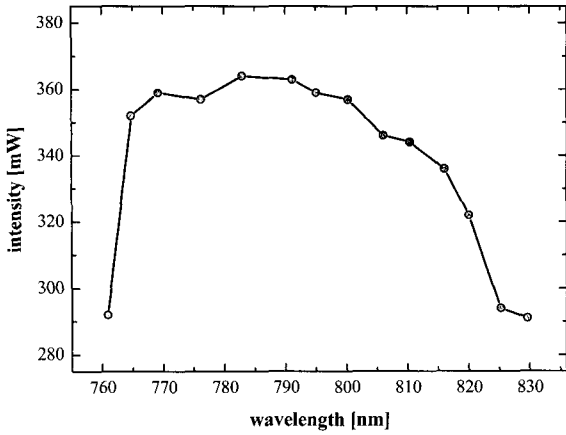


그림 7. 흡수 펌프출력 1.7w에서 파장가변 영역의 출력특성.

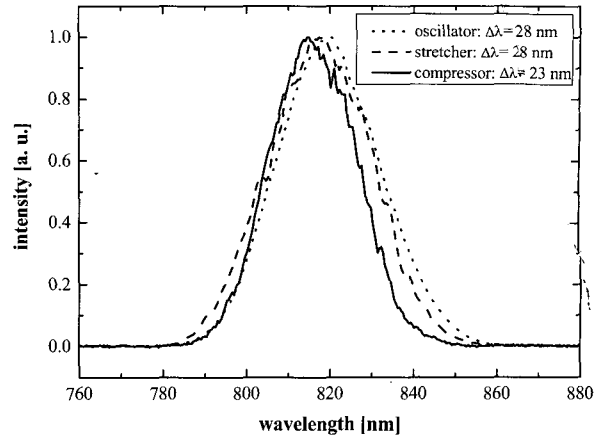


그림 9. 공진기로부터 방출된 펄스, 펄스늘림 후 펄스 및 증폭 후 재압축된 펄스의 스펙트럼.

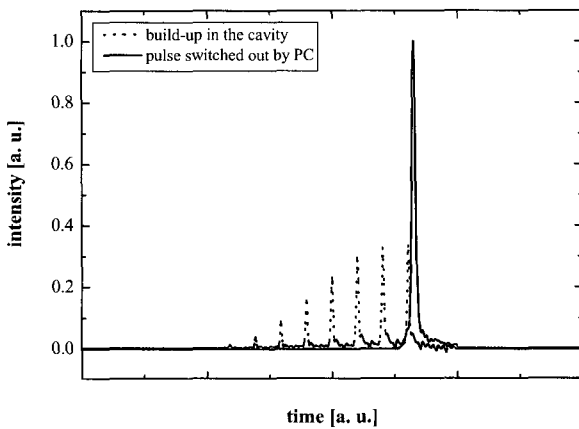


그림 8. 증폭 공진기내에서의 펄스 증폭과정과 포켈셀 작동에 의해 외부로 방출된 펄스의 특성.

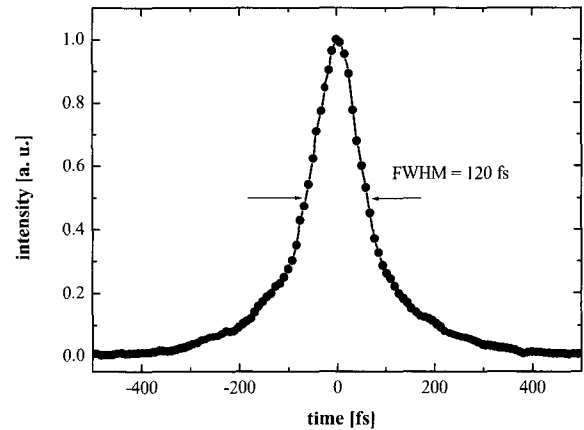


그림 10. 재압축 후 자체상관계로 측정된 자체상관곡선. (이때 측정된 반치폭은 120fs이며, 가우스 형태의 펄스로 가정할 경우 펄스의 길이는 85fs이다.)

이득 스위칭 작동구조에서 분석한 다양한 실험결과를 기반으로 재생 증폭기를 구성하였다. 공진기의 10% 출력거울을 100% 반사거울로 대체하고 포켈셀과 박막 편광자를 공진기 내부에 설치하였으며, 종자펄스와 펌프펄스 및 포켈셀 작동 시간간의 동기화를 최적화 하였다. 종자 펄스의 입사없이 포켈셀의 동작 시점을 펄스 생성시간 부근에서 최적화 하고, cavity dumping에 의해 방출되는 펄스의 출력이 최대가 되는 시간을 광신호 검출기와 오스실로스코프를 통해 확인하였다. 증폭 공진기 내부로 종자 펄스를 입사시키고 펌프 펄스와의 동기화가 이루어지면 에너지 전이가 일어나므로, 종자 펄스가 증폭 공진기 내부에서 왕복하면서 재생증폭의 과정을 거치게 된다. 이때 증폭 시작시점은 cavity dumping 동작모드에 비해 훨씬 앞당겨지므로 포켈셀의 고전압 인가 종료시점을 앞당겨 조절해 증폭 펄스의 에너지가 최대인 시점에서 포켈셀을 동작하도록 하였다. 이 때 포켈셀의 시작 시점과 종료 시점간의 차이는 약 200ns였으며, 공진기 길이로 환산해보면 종자 펄스는 총 20번의 왕복을 통해 재생 증폭 되었을 때 최대 출력을 지남을 확인하였다. 그림 8은 공진기 내부에서 종자펄스가 증폭매질을 왕복운동을 하며 증폭되는 과정

과 증폭이 최고점일 때 포켈셀 동작으로 인해 공진기 외부로 빠져 나온 펄스를 측정할 예를 보여준다.

이렇게 증폭된 펄스의 스펙트럼 반치폭은 그림 9에서 보듯이 재생증폭 시 발생하는 gain-narrowing 현상에 의해 초기 28nm 에서 23nm 로 줄어 들었으며, 공진기의 중심파장인 820nm 에서 818nm 로 다소 단파장 쪽으로 옮겨갔다.

펌프 레이저의 출력이 5.5W (이는 흡수펌프출력 3.9W에 해당) 일 때, 증폭 후 박막편광자에서 반사되어 공진기로부터 방출된 최대 출력은 960mW였으며, 펄스 압축기를 통해 펄스늘림기와 증폭 매질에서 발생하는 분산을 보정하여 펄스 재압축을 시도하였다. Type-I BBO 결정을 이용하여 자체상관계를 구성하였으며, 이를 통해 측정된 곡선의 반치폭은 120fs이다. 그림 10는 측정된 자체상관 곡선을 보여주며, 펄스형태를 가우스 형태로 가정하여 환산할 경우, 펄스길이는 85fs이다. 현재 펄스압축기를 이용하여 증폭 시 매질에서 발생하는 분산 보상이 완전히 이루어지지 않아 변환 한계 펄스를 다소 넘었으나, 이는 지속적인 증폭 시스템 최적화를 통

해 해결 될 수 있다. 증폭 후 펄스길이를 재압축하여 320 μs 의 에너지를 지닌 레이저 펄스를 얻었으며, 펄스와 펄스간의 안정성을 확인하기 위해 그 변화를 1시간 이상 측정된 결과 5% 미만의 요동을 보여 안정된 레이저 펄스 증폭 및 재압축을 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 1kHz의 반복률에서 펨토초 펄스를 방출하는 초펄스 Ti:sapphire 재생 증폭기를 제작하고 각 구성단의 특성을 분석하였다. 안정적인 증폭시스템 구현에 따른 다양한 주요 특성을 제시하기 위하여 일차적으로 재생증폭단을 이득 스위칭 작동구조로 변환하고 반복률 변화에 따른 출력, 레이저펄스 생성시간, 펄스 길이 등의 증폭기 제작시 고려되어야 할 주요변수를 측정, 분석하였다. 이득 스위칭 작동 시 레이저 펄스 생성시간과 펨프에너지와 관계를 측정, 분석하여 이론적 고찰과의 일치성을 확인할 수 있었다. 특히 이득스위칭 작동구조는 760~830nm의 파장가변 범위를 갖는 펄스폭 150ns 이하인 헤파대역 레이저로도 다양한 응용분야에 사용할 수 있음을 제시하였다. 1kHz 반복률에서 측정된 레이저 생성시간을 고려하여 증폭단의 포켓셀 동작시간을 최적화 하였으며, 증폭 후 펄스를 재압축하여 중심파장 818 nm에서 스펙트럼 반치폭 23nm, 펄스의 길이 85fs, 펄스 에너지 320 μJ 을 지닌 극초단 펄스를 안정적으로 방출하는 1kHz Ti:sapphire 재생 증폭기를 제작하였다. 이 증폭 시스템은 현재 다양한 물질의 광특성 분석에 사용되고 있으며, 증폭 공진기를 구성에 사용된 거울들의 코팅 강도문제로 현재 320 μJ 이상의 에너지 방출이 용이하지 않지만, 고강도코팅 거울 사용을 사용하고 펨프출력을 높이면 500 μJ 이상의 펄스 에너지를 손쉽게 얻을 수 있을 것을 예상한다.

감사의 글

이 논문은 한국학술진흥재단 ABRL 사업(R14-2002-062-01000-0)의 지원을 받아 수행된 연구이다.

참고문헌

- [1] M. Lorenc, M. Ziolk, R. Naskrecki, J. Karolczak, J. Kubicki, and A. Maciejewski, "Artifacts in femtosecond transient absorption spectroscopy," *Appl. Phys. B*, vol. 74, pp. 19-27, 2002.
- [2] B. H. Cumpston, S. P. Ananthavel, S. Barlow, D. L. Dyer, J. E. Ehrlich, L. L. Erskine, A. A. Heikal, S. M. Kuebler, I. S. Lee, D. McCord-Maughon, J. Qin, H. Röckel, M. Rumi, X. Wu, S. R. Marder, and J. W. Perry, "Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication," *Nature*, vol. 398, no. 4, pp. 51-54, 1999.
- [3] J. Neev, L. B. D. Silva, M. D. Feit, M. D. Perry, A. M. Rubenchik, and B. C. Stuart, "Ultrashort Pulse Lasers for Hard Tissue Ablation," *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol.2, no. 4, pp. 790-800, 1996.
- [4] A. Nahata, A. S. Weling, and T. F. Heinz, "A wideband coherent terahertz spectroscopy system using optical rectification and electro-optic sampling," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 69, no. 16, pp. 2321-2323, 1996.
- [5] I. P. Christov, M. M. Murnane, and H. C. Kapteyn, "High-Harmonic Generation of Attosecond Pulses in "the Single-Cycle" Regime," *Phys. Rev. Lett.*, vol.78, no. 7, pp. 1251-1254, 1997.
- [6] B. R. Masters, P. T. C. So, and E. Gratton, "Optical Biopsy of In Vivo Human Skin: Multi-photon Excitation Microscopy," *Lasers Med. Sci.*, vol. 13, pp. 196-203, 1998.
- [7] R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evans, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Krushelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, T. Norimatsu, S. J. Rose, T. Shozaki, K. Shigemori, A. Sunahara, M. Tampo, K. A. Tanaka, Y. Toyama, T. Yamanaka, and M. Zepf, "Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition," *Nature*, vol. 412, no. 23, pp. 798-802, 2001.
- [8] P. F. Moulton, "Ti-doped sapphire: Tunable solid-state lasers," *Opt. News*, vol. 8, no. 6, pp. 9-21, 1982.
- [9] R. L. Fork, B. I. Greene, and C. V. Shank, "First CPM," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 38, no. 9, pp. 671-672, 1981.
- [10] D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, vol. 56, pp. 219-221, 1985.
- [11] W. H. Lowdermilk and J. E. Murray, "The multipass amplifier: Theory and numerical analysis," *J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 5, pp. 2436-2444, 1980.
- [12] 차용호, 강영일, 홍경환, 남창희, "30 fs, 2 TW Ti:sapphire 레이저 시스템의 구성 및 동작특성," *새물리*, 제 37 권, pp. 469-473, 1997.
- [13] J. V. Rudd, G. Korn, S. Kane, J. Squier, G. Mourou, and P. Bado, "Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti:Al₂O₃ regenerative amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 23, pp. 2044-2046, 1993.
- [14] 김남희, 김병태, "재생증폭기의 증폭특성에 관한 수치 해석," *한국광학회지*, 제 5권 1호, pp. 67-73, 1994.
- [15] 김달우, M. Saeed, L. F. DiMauro, "Nd:YLF 레이저 펄스의 재생식 증폭," *한국광학회지*, 제 3권 1호, pp. 37-42, 1992.
- [16] S. Kane and J. Squier, "Fourth-order-dispersion limitations of aberration-free chirped-pulse amplification systems," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 14, no. 5, pp. 1237-1244, 1997.
- [17] M.R.H. Knowles and C.E. Webb, "Cavity configurations for copper vapour laser pumped titanium sapphire lasers," *Opt. Commun.*, vol. 89, pp. 493-506, 1992.
- [18] 김병태, 이형권, "복굴절 필터를 사용한 펄스동작

- Ti:sapphire 레이저의 파장 가변특성,” 한국광학회지, 제 8권 6호, pp. 450-455, 1997.
- [19] S. Takeuchi and T. Kobayashi, “Highly efficient Ti:sapphire regenerative amplifier,” *Opt. Commun.*, vol. 109, pp. 518-526, 1994.
- [20] J. M. Eggleston, L. G. DeShazer, and K. W. Kangas, “Characteristics and Kinetics of Laser-Pumped Ti:Sapphire Oscillators,” *IEEE. J. Quantum Elec.*, vol. 24, pp. 1009-1015, 1988.
- [21] W. Koechner, *Solid-State Laser Engineering* (Springer-Verlag, New York, USA, 1976), pp. 74-88.
- [22] P. F. Moulton, “Spectroscopic and laser characteristics of Al_2O_3 ,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 3, pp. 125-132, 1986.

Kilohertz Gain-Switched Ti:sapphire Laser Operation and Femtosecond Chirped-Pulse Regenerative Amplification

Yong In Lee, Yeong Hwan Ahn and Fabian Rotermund[†]

Division of Energy Systems Research, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

[†]*E-mail: rotermun@ajou.ac.kr*

Min Ah Seo and Dai Sik Kim

Department of Physics, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea

(Received October 10, 2006, Revised manuscript December 22, 2006)

We present a comprehensive study of a chirped pulse Ti:sapphire regenerative amplifier system operating at 1 kHz. Main constituents of the system are described in detail. The amplifier stage was first converted to a repetition rate-tunable kHz gain-switched nanosecond Ti:sapphire laser. Operation characteristics at different repetition rates such as build-up times of laser pulses, pump power-dependent output powers and pulse durations, damage thresholds, and tunability ranges were studied. Based on the results achieved, the switching time of the Pockel's cell used and the round trip numbers in the regenerative amplifier were optimized at 1 kHz. The output pulses with a pulse width of 50 fs from a home-made Kerr lens mode-locked Ti:sapphire oscillator were used as seed pulses. The pulses were expanded to 120ps in a grating stretcher prior to coupling into the 3-mirror amplifier cavity. After amplification and recompression, a stable 1kHz Ti:sapphire regenerative amplifier system, which delivers 85-fs, 320- μ J pulses, was fully constructed.

OCIS code : 140.3280, 140.3380, 140.3540, 140.4050.