

반도체 레이저 여기 펄스초 Cr:LiSAF 레이저

곽노민 · 박종대¹ · 조창호

배재대학교 전산전자물리학과
(302-735) 대전광역시 서구 도마2동 439-6번지

임용식

건국대학교 응용물리학과
(380-701) 충북 충주시 단월동 322번지

노영철 · 이재형 · 장준성

서울대학교 자연과학대학 물리학과
(151-742) 서울시 관악구 신림동 산56-1번지

(2000년 8월 8일 받음, 2000년 10월 4일 수정본 받음)

반도체 포화 흡수거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror:SESAM)을 이용하여 Cr:LiSAF 레이저를 제작하고 이를 모드록킹 시켰다. 펄핑 레이저로는 파장이 667 nm이고, 출력이 500 mW인 두 대의 고출력 반도체 레이저(Coherent S-67-500C-100-H)가 사용되었으며, 레이저 결정은 Brewster-Brewster 모양의 Cr³⁺의 농도가 1.5%이고 길이가 6 mm인 것을 사용하였다. 공진기는 X-형 구조로, 곡률반경이 10 cm인 오목거울과, 군속도 보상을 위한 SF10 프리즘, 투과율이 1%의 출력거울을 사용하였다. 포화흡수체로 사용되는 SESAM의 구조는 맨위층에 10 nm의 Al_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As 양자우물과 30 쌍의 AlAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As 반사경으로 구성되어 있다. 펄핑 레이저의 출력이 800 mW일 때 레이저 출력은 3 mW였고, 중심파장은 833 nm이었으며 스펙트럼 대역폭은 4 nm, 레이저 펄스폭은 220 fs 였다.

OCIS Codes : 140.3480, 140.4050.

I. 서 론

최근 펄핑용 반도체 레이저의 가격이 낮아지고, 어레이형의 등장으로 고출력이 가능하고, 빔질이 좋은 MOPA 레이저나 테이퍼드 레이저 등이 상용화됨에 따라, 현재 여러 분야에서 사용되고 있는 고체 레이저들이 반도체 펄핑 방식으로 작동되고 있다. 반도체 레이저 펄핑의 장점은 효율이 높으며, 소형이고, 운영비가 적게 들고, 수명이 길다는 점이다. 반도체 레이저로 펄핑되는 레이저의 대표적인 예는 Nd:YAG, Nd:YVO₄, Nd:YLF, 광섬유 레이저, Er:YAG, Cr:LiSAF, Cr:LiSGAF, Cr:LiCAF 등이 있다. Cr:LiSAF은 1989년 Payne 등에 의해 발명된 이래^[1] 이를 이용한 극초단 레이저 펄스의 발생이 많이 연구되어 왔는데, Cr:LiSAF 레이저 결정은 흡수 대역이 400~500 nm, 600~700 nm로 적색 반도체 레이저로 펄핑이 가능하다는 장점을 가지고 있다.^[2] 또한 Cr:LiSAF은 아르곤 레이저나 크립톤 레이저, 색소 레이저, 플래쉬 램프 등에 의해 펄핑될 수 있다. Cr:LiSAF의 단점으로는 Nd:YAG에 비해 이득 단면적이 30배 정도 작으며, 열전도율은 Ti:Sapphire의 열전도율 보다 10배 정도 작다는 점 등이다. Cr:LiSAF와 비슷한 파장 영역에서 발진하는 레이저로는 Ti:Sapphire 레이저가 있는데 Ti:Sapphire 레이저는 여기 상태의 수명과 유도 방출

단면적은 각각 3.2 μs와 4.1×10⁻¹⁹ cm²이고, Cr:LiSAF 레이저의 여기 상태의 수명과 유도 방출 단면적은 각각 67 μs와 0.5×10⁻¹⁹ cm²이기 때문에 손실이 같은 경우 Cr:LiSAF의 문턱 펄핑 에너지는 Ti:Sapphire의 문턱 펄핑 에너지 보다 작다. D. Kopf등은 반도체 레이저로 펄핑된 Cr:LiSAF 레이저에서 출력이 1.6 W 일 때 레이저 출력 400 mW를 얻은 바 있으며,^[3] 다이오드 어레이를 펄핑레이저로 사용하여 1.1 W의 연속 출력을 얻은 바 있다.^[4] Cr:LiSAF 레이저의 발진 대역은 800 nm~900 nm로 Ti:Sapphire의 발진 대역폭 230 nm에는 미치지 못하지만 극초단 펄스를 발생시키기에는 충분하다. 실제로 D. Kopf 등은 펄스폭 100 fs를 얻었고, 27 mW의 평균 출력을 얻었다.^[5] M. J. P. Dymott와 A. I. Ferguson은 400 mW 출력의 반도체 레이저 두 대를 사용하여 34 fs의 극초단 펄스를 얻은 바 있으며,^[6] S. Uemura 등은 12 fs의 펄스폭을 얻은 바 있다.^[7]

한편 Kerr 효과만을 이용한 모드록킹 방식과 함께 극히 빠른 포화 현상을 보이는 반도체 포화 흡수 거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)에 의한 극초단 펄스를 발생하는 연구가 1990년 초부터 많이 수행되어 왔다.^[8-15] Kerr 효과를 이용하여 모드록킹되는 고체 레이저는 효율적이고 안정되게 극초단 펄스를 생성하는 장점이 있으나, 모드록킹의 시작을 위해서는 특별한 보조 수단을 사용하여야만 하므로 사용에 편의성이 다소 떨어진다. 반면, SESAM에 의한 모

¹E-mail: jdpark@mail.paichai.ac.kr

드록킹은 SESAM 에서의 손실로 인해 출력이 낮고 펄스폭이 다소 긴 단점이 있으나, 자발적으로 모드록킹이 시작되므로 사용에 편리한 장점이 있으며, 최근에는 이 분야의 기술이 비약적으로 발전해 펄스폭 면에서도 Kerr 효과만을 이용한 것과 근접한 결과를 보이고 있다.^[13]

본 연구에서는 SESAM을 이용한 모드록킹 방법으로 펄스초 Cr:LiSAF 레이저를 개발하였다. 펄핑레이저로 두 대의 500 mW 반도체 레이저가 사용되었으며, 모드록킹을 위해 SESAM을 사용하였고, 균속도 보상을 위해 2개의 프리즘을 사용하였다.

II. SESAM의 구조 및 모드록킹의 원리

본 연구에서 사용된 SESAM 은 영국 Strathclyde 대학으로부터 구입한 것으로 그 구조는 그림 1과 같다. SESAM은 반도체 거울과 포화흡수체가 결합된 것으로 반도체 거울은 GaAs 기판 위에 30층의 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/AlAs$ 로 구성되고, 각 물질의 두께는 $\lambda/4$ 이다. 포화흡수체는 맨위층에 10 nm의 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As/GaAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 양자 우물로 구성된다. SESAM은 Saturable Bragg Reflector(SBR)이라고 불리기도 한다. SESAM에서 반도체 거울은 850 nm 파장 부근에서 99.5% 이상의 반사율을 갖는데 포화흡수체가 있게 되면 레이저 출력에 따라 반사율의 크기가 달라진다. 포화흡수체로 사용되는 양자우물은 그 위치와 두께에 따라 포화흡수의 세기를 변화시킬 수 있는데, 이로 인해 반사율의 변조크기가 결정된다. 저출력 레이저의 경우 반사율의 변조 크기는 1~3%정도가 적당한 것으로 알려져 있다. 포화흡수체를 사용하여 모드록킹하는 경우 레이저 펄스폭은 포화흡수체의 이완시간, 즉 포화흡수 되었다가 원래상태로 돌아가는 시간정도인 것으로 알려져 있지만, Cr:LiSAF 레이저의 경우에는 레이저 펄스폭이 포화흡수체의 이완시간보다 훨씬 작게 된다. 그 이유는 Cr:LiSAF의 비선형 광학적 성질인 자체 위상 변조효과(Self-Phase Modulation, SPM)로 스펙트럼 대역폭이 넓어져, SESAM에서 출발한 펄스의 펄스폭이 레이저 결정을 지나 공진기를 되돌아 올 때 펄스

폭이 작게된다. 즉 공진기 내에 자체 위상변조성분이 있고, 균속도 보상이 제대로 이루어진다면, 포화흡수체에 의한 광학적 게이팅 시간보다 짧은 펄스가 생성될 수 있다. 즉 레이저 공진기내에서의 SPM 은 느린 포화흡수체에 의해서도 펄스초 발생을 가능하게 한다. SESAM 동적특성은 일반적으로 수백 펄스초의 자유 나르개의 포획 시간과 수십 피코초 이하의 트랩 이완시간으로 결정된다. 본 연구에서는 SESAM의 자유 나르개 포획시간이 500 fs 이하인 것을 사용하였다.

III. 실험

본 연구에 이용된 Cr:LiSAF 레이저 결정은 VLOC에서 구입한 것으로 Cr^{+3} 이온의 농도가 1.5%이고, 중심의 길이가 6 mm인 양면이 부루스터 각도로 연마되어 있는 것을 사용하였다. 펄핑용 반도체 레이저로는 발진 파장이 667 nm이고, 최대출력이 500 mW인 코히런트(Coherent) 사의 S-67-500C-100-H를 사용하였다. 펄프용 반도체 레이저로부터 나온 빔의 퍼짐 각은 레이저 접합면에 나란한 방향으로서는 5°, 수직인 방향으로 26°이었다. 이는 고출력인 반도체 레이저의 대표적 특성으로 발진 단면적이 매우 비대칭적이기 때문이다. 이러한 레이저 빔은 집속하기가 어려운데 개구수 0.5 정도의 평행광 렌즈로 일단 수직 방향의 빔을 평행광화 시키고, 두 개의 실린더 렌즈로 수평 방향으로 빔을 확대함과 동시에 평행 광을 만들어 이를 집속하면 원래의 반도체 레이저에서 나올때의 빔의 모양 보다는 수직, 수평방향으로의 빔의 크기가 비슷하게 만들 수 있다. 이와 같이 평행광화 된 빔은 초점거리가 10 cm인 렌즈로 공진기 안의 결정에 집속시켰다. 공진기는 그림 2에서와 같이 곡률 반경이 10 cm이고 800~900 nm에서 고반사 코팅을 한 오목거울과 평면거울, 투과율이 1%인 출력경으로 이루어진 X자 형태로 되어 있다. 결정은 구리 블록으로 자체 제작한 마운트에 장착하였고, 결정의 냉각은 열전 냉각기를 이용하였다. 두 오목 거울 사이의 거리는 공진기 안정 조건을 만족하도록 공초점 거리에 가깝게 조정하고, 결정은 두 오목 거울 사이의 가운데에 위치시키며, 집속 렌즈의 위치를 조정하여 입사 빔이 결정에 가장 작게 집속되도록 하였다.

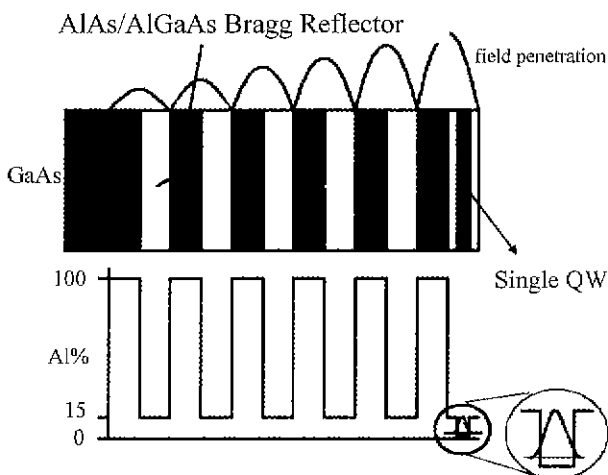


그림 1. 단일 GaAs 양자우물에 의한 AlAs/AlGaAs Bragg 반사체의 구조.

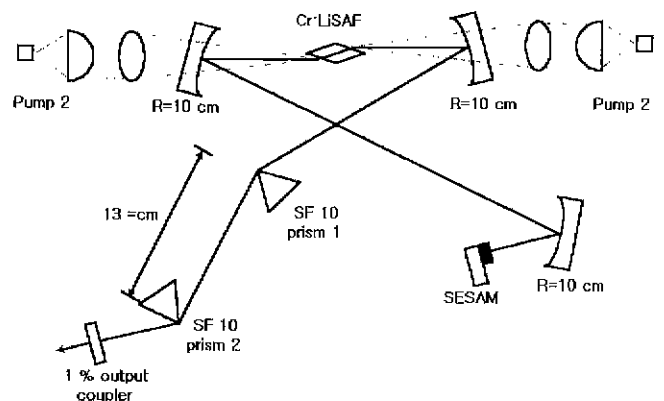


그림 2. 펄스초 Cr:LiSAF 레이저의 공진기 구조. SESAM: Semiconductor Saturable Absorber Mirror.

결정에 의해 발생하는 비점수차를 보정하기 위해 공진기의 접힌 각도가 13°가 되도록 오목거울을 조정하고, 오목 거울에 반사된 빔이 평면 거울에 반사되어 같은 경로로 되돌아가도록 하였다. 모드록킹을 위해서는 평면거울을 곡률 반경 10 cm인 오목 거울로 교체하여 레이저 빔을 SESAM에 집속 시키고, SESAM의 위치를 조절하여 모드록킹을 유도하였다. 또 군속도 보상을 위해 프리즘쌍(SF 10)을 사용하였는데, Cr:LiSAF 결정은 단축 결정으로 굴절율은 편광에 따라 굴절율이 다르다. 편광이 C축과 나란할 때의 굴절율을 n_c 라고 하고, C축과 수직 일때의 굴절율을 n_o 라고 한다면 n_c, n_o 는 다음과 같이 주어진다.^[16]

$$n_c^2 = 1.98488 + \frac{0.00235}{\lambda^2 - 0.10936} - 0.01057\lambda^2 \quad (1)$$

$$n_o^2 = 1.97673 + \frac{0.00309}{\lambda^2 - 0.00935} - 0.00828\lambda^2 \quad (2)$$

여기서 파장의 단위는 micron이고, 850 nm에서의 $n_c = 1.407$ 이고, $n_o = 1.4054$ 이다.^[17]

굴절을 n, 길이 l인 재질 내에서 위상의 2차 미분 $\frac{d^2\phi}{d\omega^2}$ 는

$$\frac{d^2\phi_m}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3 l_m}{2\pi c^2} \frac{d^2 n_m}{d\lambda^2}$$

로 주어지며 본 연구에서 사용된 프리즘의 재질은 SF10으로 굴절을 분산 방정식은^[18]

$$n^2(\lambda) = A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \quad (3)$$

인데

$$A_0 = 2.8784725, A_1 = -1.0565453 \times 10^{-2}, A_2 = 3.3279420 \times 10^{-2},$$

$$A_3 = 2.0551378 \times 10^{-3}, A_4 = -1.1396226 \times 10^{-4},$$

$$A_5 = 1.6340021 \times 10^{-5}$$

이다. 프리즘 사이의 거리가 l_p 인 프리즘 상에 의한 위상의 2차 미분은

$$\frac{d^2\phi_p}{d\omega^2} = \frac{\lambda^3}{2\pi c^2} \frac{d^2 P}{d\lambda^2} \quad (4)$$

로 주어지며, 경로에 관한 2차 미분은

$$\frac{d^2 P}{d\lambda^2} = 4 \left[\frac{d^2 n}{d\lambda^2} + (2n - n^{-3}) \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \right] l_p \sin \beta - 8 \left(\frac{dn}{d\lambda} \right)^2 l_p \cos \beta \quad (5)$$

가 되고 프리즘 내 통과 길이가 왕복 10 mm인 경우 프리즘 간격은 13 cm 이하로 하는 것이 좋다. 공진기 내에서의 군속도 보상을 하여 주기 위해서는 레이저 결정 및 프리즘 내를 통과할 때 생기는 2차 위상 미분양과 프리즘 쌍에 의해 생기는 2차 위상 미분의 양이 거의 0이거나 작은 음수가 되도록 하여야 한다. 이 양이 양이 되면 레이저 펄스는 불안정하게 되고, Chirp이 있게 된다.

IV. 결과 및 논의

반도체 레이저 여기 극초단 Cr:LiSAF 레이저의 출력은 800 mW 펄핑시 3 mW로 모드록킹된 상태의 스펙트럼과 오실로스코프로 측정된 모드록킹 펄스는 아래 사진 1, 그림 3과 같다. 여기서 파장 대역 폭은 4 nm였으며, 레이저의 펄스폭은 220 fs로 측정되었다. 사용한 펄핑용 반도체 레이저는 발진 파장이 667 nm이고, 최대 출력이 500 mW인 코히런트(Coherent)사의 S-67-500C-100-H를 사용하였다. 펄스폭 측정을 위해서 이광자 흡수(Two-Photon Absorption)를 이용한 자체상관계를 사용하였다.^[19] 주파수 대역폭 $\Delta\nu$ 와 펄스폭 Δt 의 곱은 0.38로 chirp이 많지 않음을 알 수 있다. 레이저의 출력이 낮은 이유는 반도체 레이저의 출력면의 크기가 $100 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 로 너무 커서 이를 광학계로 결정내에 작은 영상을 맺게 할 때 한계가 있고, 반도체 레이저 자체의 빔질은 접합 면에 수평인 방향으로 더 긴 형태를 가져서 효과적인 모드 매칭이 이루어지지 않아 펄핑 에너지가 레이저를 발진 시키는데 이용되지 못하고 결정내에 열을 집적시키는 역할을 하였기 때문인 것으로 판단된다. 결정내에 누적된 열은 여기 상태의 수명을 줄여주는 효과가 있어 이득의 감소를 나타내게 된다.^[20] 레이저 출력을 증가시키기 위해서는 좋은 빔질의 고효율 반도체 레이저를 사용하면

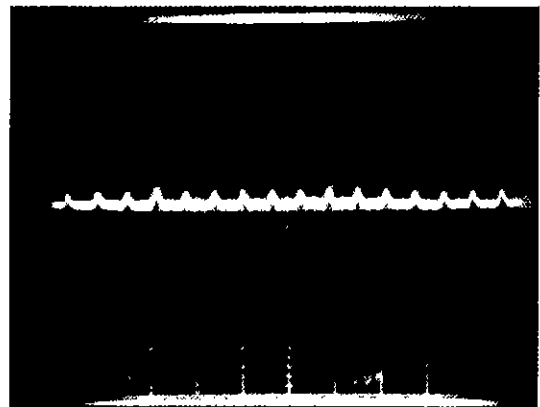


사진 1. 오실로스코프로 측정된 모드록킹 펄스.

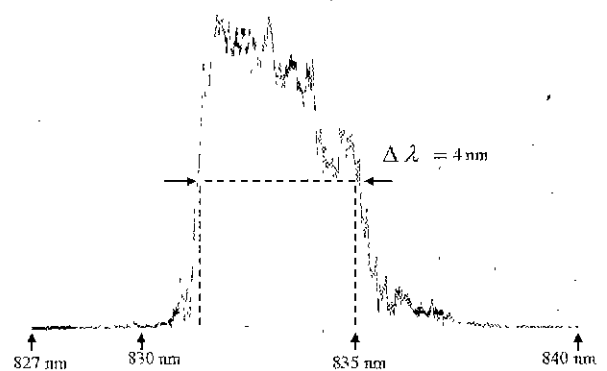


그림 3. 모드록킹된 상태의 스펙트럼.

가, Tapered Amplifier를 사용하여 빔질을 향상시키고, 공진기 내에서 펌프광과 레이저광이 잘 겹치도록 하고. 기타 손실을 줄이면 될 것으로 판단된다. 또한 결정의 두께를 1 mm 정도로 얇게 하여, 결정마운트에 잘 접착시켜서 열이 잘 빠져 나갈 수 있도록 하면 열에 의한 효과를 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

V. 결 론

반도체 레이저에 의해 펌핑 되는 극초단 Cr:LiSAF 레이저를 제작하였다. 공진기 형태는 X자 형태로 500 mW 반도체 레이저(Coherent S-67-500C-100-H)를 사용하였고, 이용된 결정은 부루스터—부루스터 면으로 되어 있으며 Cr^{+3} 이 1.5% 도핑된 길이 6 mm의 결정이었다. 공진기 내부에서 발생하는 비점수차를 보상하기 위하여 공진기의 접힌 각도를 조정하였는데 그 각도는 결정에서 곡률 거울에서의 입사각을 6.5° 로 하였다. 본 연구에서는 모드록킹의 시작과 유지를 위해 반도체 포화 흡수 거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror: SESAM)을 사용하였는데, 그 구조는 30층의 $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 거울로 이루어져 있고 10 nm의 양자 우물이 표면 층에 위치하고 있다. SESAM에 레이저빔을 집속시키기 위하여 초점거리 50 mm의 오목렌즈를 사용하였다. 군속도 분산을 막기 위해 프리즘 쌍(SF 10)을 이용하였는데, 이때 프리즘 쌍의 거리는 13 cm였다. 모드록킹시 출력은 800 mW에 대하여 3 mW를 얻었다. 모드록킹 펄스의 스펙트럼폭은 4 nm였다. 모드록킹 펄스폭은 이광자 흡수(Two-Photon Absorption)를 이용한 자체상관계^[17]를 사용하였으며, 약 220 fs이었다. 본 연구에서는 SESAM의 포화흡수 이완시간이 수백 펨토초 이라도, 공진기 내에 자체 위상 변조 성분이 있으면, SESAM의 포화흡수 이완시간보다 빠른 펌프초 레이저 펄스가 생성될 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제작한 레이저는 빠른 현상들에 대한 분광학 광원 등으로 이용될 수 있고, 2광자를 이용한 의료 영상, Optical Coherent Tomography 등에 이용될 수 있다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비와 교육비의 기초과학 연구 프로그램(BSRI-96-2421) 의해 연구 되었습니다. 본 연구에 사용된 SESAM을 제작해준 영국 strathclyde 대학의 D. Burns 박사에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and H. W. Newkirk, *J. Appl. Phys.* **66**, 1051 (1989).
- [2] 윤장한, 박중대, 조창호, 이재형, 장준성, *한국광학회지*, 47 (1997).
- [3] D. Kopf, J. A. der Au, U. Keller, G. L. Bona, and P. Roentgen, *Opt. Lett.* **20**, 1782 (1995).
- [4] D. Kopf, U. Keller, M. A. Emanuel, R. J. Beach, and J. A. Skidmore, *Opt. Lett.* **22**, 99 (1997).
- [5] D. Kopf, K. J. Weingarten, L. R. Brovelli, M. Kamp, and U. Keller, *Opt. Lett.* **19**, 2143 (1994).
- [6] M. J. P. Dymott and A. I. Ferguson, *Opt. Lett.* **20**, 1157 (1995).
- [7] S. Uemura and K. Torizuka, *Opt. Lett.* **24**, 780 (1999).
- [8] U. Keller, W. H. Knox, and G. W. 'Hoof, *IEEE J. Quantum Electron.* **28**, 2123 (1992).
- [9] S. Tsuda, W. H. Knox, E. A. de Souza, W. Y. Jan, and J. E. Cunningham, *Opt. Lett.* **20**, 1406 (1995).
- [10] I. D. Jung, F. X. Kartner, N. Matuschek, D. H. Sutter, F. Morier-Genoud, Z. Shi, V. Scheuer, M. Tilsch, T. Tschudi, and U. Keller, *Appl. Phys. B* **65**, 137 (1997).
- [11] D. Kopf, A. Prasad, G. Zhang, M. Moser, and U. Keller, *Optics Lett.* **22**, 621 (1997).
- [12] F. X. Kartner, J. A. der Au, and U. Keller, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **4**, 159 (1998).
- [13] D. H. Sutter, I. D. Jung, F. X. Kartner, N. Matuschek, F. Morier-Genoud, V. Scheuer, M. Tilsch, T. Tschudi, and U. Keller, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics* **4**, 169 (1998).
- [14] M. J. Lederer, B. Luther-Davies, H. H. Tan, and C. Jagadish, *IEEE J. Quantum Electron.* **34**, 2150 (1998).
- [15] A. Robertson, U. Ernst, R. Knappe, R. Wallenstein, V. Scheuer, T. Tschudi, D. Burns, M. D. Dawson, and A. I. Ferguson, *Optics Commun.* **163**, 38 (1999).
- [16] M. D. Perry, S. A. Payne, T. Ditmire, R. Beach, G. L. Quarles, W. Ignatuk, R. Olson, and J. Weston, *Laser Focus World*, Sept, 85 (1993).
- [17] S. A. Payne, W. F. Krupke, L. K. Smith, W. L. Kway, L. D. DeLoach, and J. B. Tassano, *IEEE J. Quantum Electronics* **28**, 1188 (1992).
- [18] *Optical Glass Catalog*, Ohara Inc, 1990.
- [19] Y. C. Noh, J.-H. Lee, J.-S. Chang, Y.-S. Lim, and J.-D. Park, *J. Opt. Soc. Korea*, 27 (1999).
- [20] M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai, *J. Opt. Soc. Am. B* **9**, 2271 (1992).

A femtosecond Cr:LiSAF laser pumped by semiconductor lasers

Noh-Min Kwak, Jong-Dae Park[†], and Chang-Ho Cho

Dept. of Physics, Pai-Chai University, Taejon 302-735, KOREA

[†]E-mail: jdpark@mail.paichai.ac.kr

Yong-Sik Lim

Dept. of Applied Physics, Kon-Kuk University, Chungju 380-701, KOREA

Young-Chul Noh, Jai-Hyung Lee, and Joon-Sung Chang

Dept. of Physics, Seoul National University, Seoul, 151-742, KOREA

(Received August 8, 2000. Revised manuscript received October 4, 2000)

We demonstrate self-starting passive mode locking of a Cr:LiSAF laser, using a Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM). Two high-power red semiconductor lasers (Coherent S-67-500C-100-H) of wavelength 667 nm and maximum power of 500 mW were used as pump lasers. The cavity has 10 cm radius-of-curvature folding mirrors, two SF 10 prisms, a 99% reflectivity output coupler and a SESAM at the focus of a 10 cm radius-of-curvature mirror. We used the laser crystal in Brewster-Brewster shape with 1.5% Cr³⁺ ion concentration and the length of 6 mm. An X-shaped resonator was used to compensate the astigmatism induced by the crystal. The structure of the SESAM consists of 30 pair of AlAs/Al_{0.15}Ga_{0.85}As layer, with a 10 nm GaAs quantum well situated in the topmost layer. Output spectra were centered at 833 nm, with 4 nm spectral bandwidth and pulse width was measured to be 220 fs. Output power of 3 mW is obtained at a pump power of 800 mW.

OCIS codes : 140.3480, 140.4050.