

1. 서론

1960년 루비(Ruby) 레이저가 처음 발명된 이래 기체, 액체, 고체, 반도체 등 다양한 종류의 매질을 이용한 레이저가 개발되어 정보통신, 의료, 물질공정, 연구개발, 계측, 국방 등 매우 광범위한 분야에서 사용되어지고 있고 그 사용 영역이 날로 확대되어 가는 추세에 있다. 그러나 레이저의 특성 중 하나인 단색성과 좁은 파장 변조 영역으로 인해 기존에 레이저(표 1)가 제공할 수 없는 파장영역의 필요성이 날로 증대되고 있다.

예를 들면 의료 분야에서 피부의 반점이나 문신을 제거하는 목적에 레이저가 사용되는데 반점과 문신의 색깔에 따라 이들이 가장 잘 흡수하는 파장을 사용하여 효과적으로 치료할 수 있다. 거리나 속도 측정에

으며, 보안을 요하는 집수합 사이의 교신을 위해서는 바닷물에서 가장 흡수가 적은 청록색 파장($\sim 0.475 \mu\text{m}$)의 빛을 사용해야 한다. 또한 물질을 절단 및 가공하거나 반도체 소자 위에 마킹(marking)을 할 때는 가공하는 물질의 종류와 요구되는 정밀도에 따라 가장 효과적으로 반응하는 파장을 선택해야 되며, 연구용 분광 실험에서는 분자 및 고체에서 일어나는 물리적 현상에 따라 매우 다양한 종류의 파장이 요구된다. 안과의 라식 수술과 반도체 리쏘그라피용 광원으로는 $0.16 \mu\text{m}$ 부근의 극 자외선 파장이 필요한 반면, 치과 치료에서는 $2.5 \mu\text{m}$ 부근의 중적외선 파장이 필수적이다. 레이저 핵융합 연구에서는 단파장 광원일수록 효과가 크기 때문에 $1.064 \mu\text{m}$ 의 Nd:YAG 레이저 파장을 뿜로 줄인 $0.355 \mu\text{m}$ 파장이 사용되어진다. 또한

특집 ─ 단결정 연구 소개

빛의 연금술을 실현시키는 파장변환 비선형 광학 단결정

윤춘섭*

는 사람의 눈에 안전하고 공기 중에서 멀리 전파될 수 있는 $1.5 \mu\text{m}$ 이상의 적외선 파장을 사용할 필요가 있

차세대 디스플레이로 각광 받게될 레이저 TV 개발에는 빛의 삼원색에 해당되는 청, 녹, 적색의 레이저 광원이 필수적이다.

이와 같은 경우, 원하는 파장을 생성시킬 수 있는 새로운 레이저 매질을 개발하여야 하지만 이것이 항상 가능하지는 않다. 왜냐하면 원하는 파장의 빛을 두 에너지 준위 사이의 천이에서 방출하는 원자 및 분자가 항상 존재하지는 않기 때문이다. 그러나 비선형 광학 현상을 이용하면 기존의 레이저 파장을 이용하여 우리가 원하는 목적의 파장을 얻을 수 있는데, 이것이 조화파 발생(harmonic generation), 광혼합(frequency

표 1. 대표적 레이저의 파장

레이저	파장(μm)	레이저	파장(μm)
He-Ne	0.6328	AlGaAs	0.620~0.895
CO ₂	9.600~10.600	Eximer-ArCl	0.175
Nd:YAG	1.064	Eximer-KrF	0.248
Ti:Sapphire	0.780~0.900	Eximer-XeBr	0.282
AlGalnP	0.630~0.680	Dye-	0.560~
GaAs	0.840	Rhodamine-6G	0.640
		Dye-Xanthene	0.500~0.700

* KAIST 연구원

mixing) 그리고 광 파라메트릭 발진(optical parametric oscillation) 방법이다. 조화파 발생 방법을 이용하면 펌프광의 파장을 $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots$ 로 줄일 수 있고, 광혼합 방법으로는 파장이 다른 두 빛의 주파수를 더하거나 빼준 주파수에 해당되는 새로운 파장의 빛을 만들 수 있으며, 광 파라메트릭 발진방법을 이용하면 펌프광의 파장보다 긴 다른 파장의 빛으로 연속해서 변환시킬 수 있다. 이와 같이 펌프 레이저의 파장을 원하는 파장으로 변환시켜주는 기능을 하는 물질이 비선형 광학 단결정인데, 비선형 광학 특성이 우수하고, 온도, 습도 등 외부 환경 변화에 안정적인 비선형 광학 단결정의 개발이 정보통신, 의료, 산업, 연구, 계측, 국방 등 다양한 분야에서의 응용에 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.

2. 파장변환 방법

2.1. 비선형 광학 효과

비선형 광학 현상이란 강한 레이저 광의 전자기장이 매질과의 상호작용에 따라 생기는 현상으로, 강한 전자기장에 대한 매질의 전기분극이 아래 식 (1)과 같이 선형적으로 뿐만 아니라 비선형적으로 반응하기 때문에 나타난다^[12].

$$P = \epsilon_0(\chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} : EE + \chi^{(3)} : EEE + \dots). \quad (1)$$

여기서 ϵ_0 는 진공 중의 유전율, E 는 전기장, $\chi^{(n)}$ 은 선형 전기 감수율, $\chi^{(n)}$ ($n \geq 2$)은 n 차의 비선형 전기 감수율을 나타낸다. 빛에 의해 유도된 전기분극의 비선형 항들은 다양한 비선형 광학 효과의 원인이 되며, 이를 이용하면 전자기파를 기술하는 주요 특성들인 진폭, 파장, 위상, 편광방향 등에 대한 변조가 가능하다^[9]. 다양한 비선형 광학 현상의 응용분야들 중에서 비선형 광학의 초기부터 지금까지 지속적으로 가장 많은 관심을 끌고 있는 분야가 바로 파장변환이다^[34].

고효율의 파장변환을 얻기 위해서 2차 비선형 광학 현상들이 널리 이용되고 있는데, 2차 비선형 광학 현상들은 일반적으로 다음과 같은 비선형 미분방정식으로

로서 기술된다^[2].

$$\frac{dA_i}{dz} = \frac{iD_{12}\omega_i d_{eff}}{n_i c} A_1 A_2 e^{i\Delta k z} \quad (2)$$

식 (2)는 ω_1 과 ω_2 의 주파수를 갖는 전기장이 결합하여 $\omega_3 (= \omega_1 + \omega_2)$ 의 주파수를 갖는 전기장을 발생시키는 경우를 기술하고 있는데, A_i ($i=1, 2, 3$)와 n_i 는 각각 ω_i 에 대한 전기장의 진폭과 굴절률을 나타내며, d_{eff} 는 유효 2차 비선형 광학 계수를 의미한다. 그리고 D_{12} 는 ω_1 과 ω_2 가 같은 경우, 즉 2차 조화파 발생의 경우 1의 값을 가지며, 서로 다른 경우 2의 값을 갖는다. Δk 는 주어진 비선형 광학 상호작용에 대한 위상부정합이라 불리는데, 그림 1은 위상부정합이 파장변환 과정에 미치는 효과를 보인 것이다. Δk 가 0인 경우 가장 높은 효율의 비선형 파장변환을 얻을 수 있는데, 이 때를 위상정합 조건이라 한다.

2차 비선형 광학 효과를 이용하여 얻을 수 있는 대표적인 파장변환 방법인 이차 조화파 발생(second-harmonic generation), 광혼합(frequency mixing), 그리고 광 파라메트릭 발진(optical parametric oscillation)과 최근에 많은 관심을 끌고 있는 준 위상정합(quasi-phase-matching)에 대해서 고찰하고자 한다.

2.2. 이차 조화파 발생 (Second-Harmonic Generation)

이차 조화파 발생은 식 (2)에서 ω_1 과 ω_2 가 같은 경

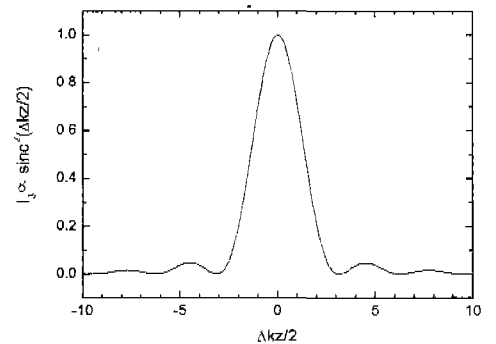


그림 1. 2차 비선형 파장변환 과정에 대한 위상부정합의 효과

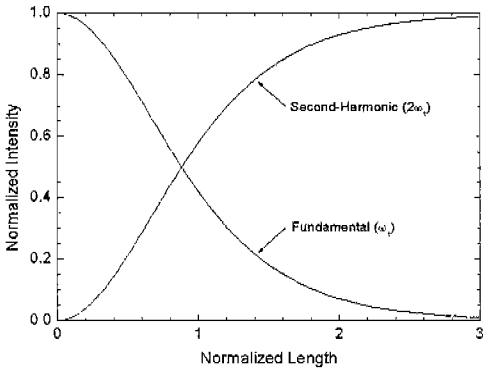


그림 2. 매질 내 진행거리에 따른 기본파 및 2차 조화파의 세기

우에 해당하며, 이 때 ω_3 는 $2\omega_1$ 의 값을 갖는다. 이차 조화파 발생에 대한 위상정합의 경우, I_3 / I_1 으로 정의 되는 파장변환 효율 η 는

$$\eta = \frac{2\omega_1^2 d_{eff}^2 L^2}{\epsilon_0 n_1^2 n_3 c^3} \text{sinc}^2(\Delta k L / 2) \quad (3)$$

로 주어진다¹²⁾. 여기서 L 은 비선형 광학 결정의 길이를 나타낸다. 이차 조화파 발생을 이용하면, 어떤 주파수의 레이저 빛을 비선형 광학 결정에 입사시켜 두 배의 주파수를 갖는 빛을 만들 수 있는데, 주로 기존의 고출력 적외선 레이저를 이용하여 녹색 혹은 청색의 광원을 얻는 목적으로 많이 활용되고 있다⁸⁷⁾.

그림 2는 위상정합 조건에서 기본파(ω_1)를 비선형 광학 결정에 입사시켰을 때 결정 내 진행거리에 따른 기본파와 이차 조화파($2\omega_1$)의 세기 변화를 보이고 있다²³⁾. 결정 내 진행거리가 증가함에 따라 이차 조화파의 세기가 빠르게 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 비선형 광학 결정의 길이가 이차 조화파 발생 효율을 높이는 데 결정적인 요소로서 작용한다. 그러나 일반적으로 사용되는 각도 튜닝에 의한 위상정합의 경우에는, 상광선과 이상광선의 진행경로가 물리적으로 어긋남으로써 기본파간의 상호작용과 기본파와 변환파 사이의 상호작용이 감소되는 현상으로 생기는 walk-off 효과로 인해서, 결정 길이가 길어지더라도 조화파의 세기가 계속해서 증가하지는 않는다⁸⁸⁾. 결정의 주축 방향으로 파가 진행하는 비입계 위상정합(noncritical phase-matching)에서는 walk-off 효과가 소멸되기 때문에 그림 2에서와 같이 길이에 따라

조화파의 세기가 증가하게 된다²²⁾.

2.3. 광혼합 (Frequency Mixing)

광혼합은 서로 다른 주파수 ω_1 과 ω_2 를 갖는 빛들을 비선형 광학 결정에 입사시켜, 두 주파수의 합($\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$) 또는 차($\omega_3 = |\omega_1 - \omega_2|$)에 해당하는 주파수를 얻는 합 주파수 발생(sum-frequency generation)과 차 주파수 발생(difference-frequency generation)을 포괄적으로 의미한다. 이 때 합 또는 차에 해당하는 주파수의 효율적인 발생은 위상정합 조건이 어느 비선형 광학 과정을 만족시키는가에 달려 있다. 광혼합의 경우 이차 조화파 발생과는 달리 파장이 다른 두 개의 광원이 필요하게 되므로, 적절한 두 광원의 조합을 통해 이차 조화파 발생으로는 얻을 수 없는 파장을 만들 수 있다는 장점이 있다. 합 주파수 발생은 자외선 영역의 광원을, 차 주파수 발생은 중적외선 영역의 광원을 개발하기 위한 용도로 활용될 수 있다^{10,11)}.

비선형 광학 결정에서 진행거리에 따른 변환파의 세기는, 합 주파수 발생 위상정합의 경우 그림 2와 비슷한 특성을 보인다. 한편 차 주파수 발생의 경우는 위상정합 조건하에서 진행거리에 따른 변환파의 세기가 그림 2와 아주 다른 양상을 보인다. 그림 3은 ω_1, ω_2 이고 주파수 ω_3 을 갖는 빛의 세기가 주파수 ω_2 를 갖는 빛의 세기보다 아주 큰 경우, ω_3 의 주파수를 갖는 빛 뿐만 아니라 ω_2 의 주파수를 갖는 빛도 거리에 따라 세기가 함께 증가하는 것을 보여 주고 있다¹²⁾.

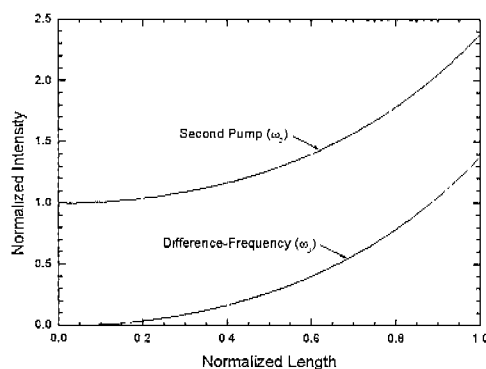


그림 3. 매질 내 진행거리에 따른 차 주파수 발생의 세기

2.4. 광 파라메트릭 발진 (Optical Parametric Oscillation)

광 파라메트릭 발진은 차 주파수 발생의 특수한 경우에 해당한다. $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ 의 차 주파수 발생에 대한 위상정합이 성립하는 조건에서, ω_1 의 주파수를 갖는 빛을 비선형 광학 결정에 입사시키면, 진공요동(zero-point vacuum fluctuation)으로 결정 내에 존재하는 ω_2 또는 ω_3 광자와의 상호작용에 의해서 차 주파수 발생이 일어난다^[12]. 이 경우 ω_2 또는 ω_3 의 주파수를 갖는 빛의 세기가 무시할 수 있을 정도로 작으므로, 차 주파수 발생 효과는 대부분의 상황에서 무시된다. 그러나 비선형 광학 결정을 ω_2 에 대한 공진기 내에 위치시키면, ω_2 와 ω_3 에 대한 빛이 공진에 의해 증폭되어 높은 파장변환 효율을 얻는 것이 가능한데, 이것이 광 파라메트릭 발진의 원리이다^[13]. 그림 4는 광 파라메트릭 발진기의 기본적인 개략도이다.

광 파라메트릭 발진은, 결정의 방향 혹은 온도를 변화시켜 위상정합 조건을 조절할 수 있기 때문에, 위상정합 조건이 허용되는 넓은 파장 범위에서 $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$ 의 관계를 만족하는 임의의 두 파장 λ_2 와 λ_3 를 연속적으로 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있다^[4].

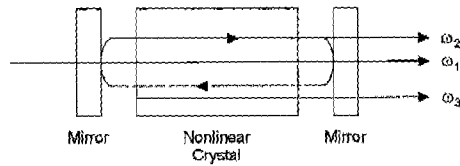


그림 4. 광 파라메트릭 발진기의 기본 구성

2.5. 준 위상정합 (Quasi-Phase-Matching)

2.2에서 언급한 바와 같이, 체적 단결정에서는 일반적으로 walk-off 효과에 의해 파장변환 효율이 결정 길이가 증가할 때 계속해서 증가하지 않고 포화 효과가 나타난다. 이러한 walk-off 효과는 결정의 주축 방향에서는 완전히 없어지게 된다. 많은 비선형 광학 결정에서는 비선형 광학 계수 d_{33} 성분이 다른 성분들에

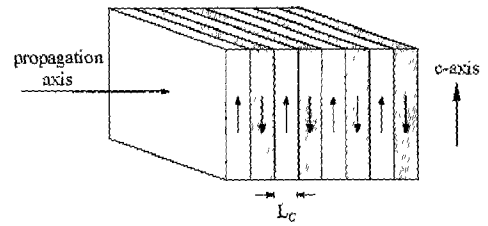


그림 5. 준 위상정합 소자의 구조

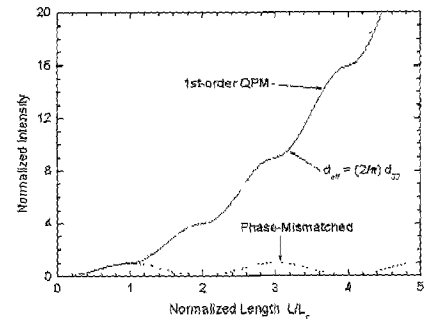


그림 6. 준 위상정합에서 진행거리에 대한 변환파의 세기

비해 월등히 큰 값을 갖기 때문에, c-축 방향으로 편광된 빛을 결정의 한 주축(principal axis) 방향에 평행하게 입사시키면 비선형 광학 계수가 큰 d_{31} 성분을 이용하여 높은 파장변환 효율을 얻을 수 있다. 그러나 특정한 파장변환에 대해 주축 방향에서 위상정합 조건이 정확히 만족될 가능성은 거의 없다. 따라서 결정의 온도를 조절하여 위상정합 조건을 인위적으로 만족시킬 수도 있지만, 이것이 가능한 경우는 매우 드물다. 이러한 제한 요인들을 극복하기 위해 도입된 방법이 준 위상정합이다^[8].

준 위상정합에서는 최대 비선형 광학 계수 d_{33} 의 값을 이용할 수 있도록 c-축 방향으로 편광된 빛을 결정의 한 주축 방향으로 입사시키는데, 그림 5에서와 같이 강유전체 결정의 분극을 결맞음 길이(coherent length) L_c 만큼 주기적으로 반전시키면 반전된 분역에서는 비선형 광학 계수가 $-d_{33}$ 이 되어 한 분역에서 생긴 위상부정합이 다른 분역에서 완전히 상쇄된다. 이 때 결정 내 진행거리에 따른 파장변환 효율은 그림 6의 실선과 같이 계속 증가하게 된다^[14]. 그림 6의 굵은 점선으로 표시한 곡선은 주기적 분극반전이 안된 결정



에서 위상부정합으로 인해 파장변환 효율이 진행거리 에 따라 증가하지 못하고 2Lc를 주기로 진동하는 양상을 보이고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 준 위상정합을 이용하면 비선형 광학 계수의 최대 성분 d_{33} 의 60% 이상을 활용할 수 있으며, 비입계 위상정합조건을 만족시킴으로써 walk-off 효과가 발생하지 않아 결정의 길이를 증가시켜 높은 효율의 파장변환을 얻는 것이 가능하다.

3. 주요 파장변환용 비선형 광학 단결정

원하는 파장영역으로 펄프광의 파장을 효율적으로 변환시키기 위해서는 다음과 같은 광특성을 고려하여 파장변환 물질을 개발 및 선택하여야 한다.

- 2차 비선형 광학 계수 : 2차 비선형 광학 계수 텐서 d ($=\frac{1}{2}\chi^{(2)}$)의 성분들 값이 모두 크면 좋지만, 위상정합 조건에서의 유효 2차 비선형 광학 계수 d_{eff} 의 값이 큰 것이 가장 중요하다.
- 위상정합 : 빛의 진행방향에서 기본파와 변환파의 굴절률이 같은 경우를 의미하는데 효율적인 파장변환을 얻기 위해서는 아무리 d 값이 크더라도 위상정합 조건을 만족시키는 것이 필수적이다.
- 투명도 : 펄프파의 파장과 변환파의 파장에 대한 투과율이 높아야 한다.
- 위상정합 허용각 및 허용온도 : 위상정합 조건을 만족시키는 각도 및 온도 범위가 넓어야 한다.
- 광손상 문턱값 : 레이저에 의해 손상받지 않고 견딜 수 있는 광손상 문턱값이 높아야 한다.
- 어긋남(walk-off) 효과 : 상광선과 이상광선의 진행경로가 상대적으로 빋겨나감으로써 기본파 간의 상호작용 혹은 기본파와 변환파 사이의 상호작용이 감소되는 현상으로 높은 파장변환 효율을 얻기 위해서는 어긋남 각도(walk-off angle)가 작아야 한다.
- 기계적, 화학적, 열적 안정성 : 파장변환 소자의 제작 및 사용 시 기계적 강도가 크고, 화학적, 열적 안정성이 높아 가공과 유지 보수에 유리하다.
- 싸고 우수한 품질의 단결정 : 단결정 성장이 용이하여 대구경, 고품질의 단결정이 단기간에 성장되

어 저렴한 가격으로 공급되어야 한다.

따라서 어느 한 물질이 다른 물질에 비해 항상 월등한 파장변환 특성을 갖는다고 말할 수는 없으며 주어진 조건(파장영역, 펄프광의 출력, 투과율, 위상정합 여부, 가격 등)을 고려하여 가장 최적의 비선형 광학 물질을 선택할 필요가 있다. 본 논고에서는 현재 가장 많이 사용되고 있는 파장변환 단결정들인 KTP 계열(KTP, KTA, RTP, RTA), 봉산 계열(β -BBO, LBO, CLBO, YCOB), LiNbO_3 , LiTaO_3 , KNbO_3 에 대해 관심을 집중하고자 한다.

3.1. KTP 계열 단결정

KTP(KTiOPO_4) 계열의 비선형 광학 단결정은 화학식이 MTiOXO_4 ($\text{M}=\text{K, Rb, Tl, Cs, X}=\text{P, As}$)로 표시되는 물질로서, 1976년 미국 Du Pont사에서 KTP가 최초로 개발된 후^[4] KTA, RTP, RTA 등이 차례로 개발되었다. 이들 모두는 광학적 쌍축 결정으로 orthorhombic 구조의 mm2 점군에 속해 있고, 상온에서 강유전성을 가지고 있다(단 CTP는 예외)^[15]. KTP 계열의 단결정들은 비선형 광학적 성질이 우수해 현재 많이 사용되고 있는 파장변환 단결정 그룹 중의 하나이며 특히 KTP^[15-18]가 가장 많이 사용되고 있고, KTA^[19-21], RTP^[22], RTA^[23-26]도 사용 빈도가 계속 증가하고 있다.

KTP 단결정^[15-18]은 광투과 영역이 350~4300 nm로 비교적 넓으며 다른 결정에 비해 적외선 영역의 응용에 유리하다. KTP의 유효 2차 비선형 광학 계수의 값은 1064 nm 파장에서 유형 I 위상정합의 경우에는 0.46 pm/V이지만, 유형 II 위상정합의 경우 3.1 pm/V의 큰 값을 가지고 있다. 어긋남 각도 유형 I의 경우는 2.86°인 반면 유형 II의 경우 0.26°의 작은 값을 가지고 있어, 유형 II 위상정합이 2차 조화파 발생에 주로 사용되고 있다. KTP 단결정은 큰 비선형 광학 계수로 인해 파장변환 효율이 매우 높고 비교적 넓은 위상정합 허용각($\Delta\theta=2.52^\circ$)과 허용 온도($\Delta T=25.7^\circ\text{C}$)를 가지고 있어 파장변환에 유리하지만 1000 nm 이하의 파장에서는 위상정합이 되지 않는 단점이 있다. KTP의 결정성장 방법은 고온용제(flux) 성장법^[27]과 수열합성(hydrothermal) 성장법^[28]의 두

빛의 연금술을 실현시키는 파장변환 비선형 광학 단결정

표 2. KTP 계열의 단결정들에 대한 광학적 특성 비교

	KTP	KTA	RTP	RTA
광투과영역 (μm)	0.35~4.5	0.35~4.5	0.35~5.3	0.35~5.8
비선형 광학 계수 (pm/V)	$d_{31}=2.5, d_{32}=4.4,$ $d_{33}=16.9$	$d_{31}=3.3, d_{32}=4.1,$ $d_{33}=17.1$	$d_{31}=2.8, d_{32}=4.2,$ $d_{33}=16.2$	$d_{31}=2.3, d_{32}=3.8,$ $d_{33}=15.8$
유효 비선형 광학계수 d_{eff} ($\text{pm/V}, 1064 \text{ nm}$)	0.46 (I) 3.1 (II)	2.98 (II)	.	0.38 (I)
광손상 문턱값 ($1064 \text{ nm}, 10 \text{ ns}, 10 \text{ Hz}$)	450 MW/cm^2	.	.	400 W/cm^2

가지가 있다. 고온용제 성장법으로 기른 KTP 단결정의 보고된 레이저 광손상 문턱값은 $10 \text{ ns}, 10 \text{ Hz}$ 의 1064 nm Nd:YAG 레이저에서 450 MW/cm^2 이지만, 실제적으로는 결정 결함으로 인해 이보다 훨씬 낮은 세기에서도 gray tracking과 같은 광손상이 쉽게 일어나는 단점이 있다. 수열합성 성장법으로 성장시킨 결정은 이 결정 결함이 제거되어 광손상 문턱값이 수 GW/cm^2 까지 증가되었다고 보고되었다^[31].

RTA 단결정^[19-21]은 KTP와 비슷한 성질을 가지고 있는데, 광투과 영역이 $350\sim 5800 \text{ nm}$ ^[32]로 KTP 단결정보다 적외선 영역에서의 광투과성이 뛰어나고^[33], 유효 비선형 광학 계수 또한 1300 nm 파장에서 유형 II 위상정합의 경우 3.46 pm/V 로 KTP보다 크기 때문에 최근 많은 관심을 받고 있다. 그러나 RTA는 가장 많이 쓰이는 Nd:YAG 레이저의 1064 nm 파장에서 유형 II 위상정합이 만족되지 않아 유효 비선형 광학 계수 값이 작은 유형 I 위상정합 밖에 사용할 수 없다는 단점이 있다. 레이저 광손상 문턱값은 KTP 단결정과 같은 조건에서 400 MW/cm^2 으로 KTP보다 약간 작으나 KTP에서 나타나는 gray tracking과 같은 광손상은 일어나지 않는다. RTA 단결정은 고온용제 성장법으로 성장시키는데 강유전 및 강탄성 상전이 온도가 결정 성장 온도보다 낮기 때문에 상온에서 강탄성 다분역 구조가 결정 내에 존재하여 파장변환 소자로 이용시 전기 폴링 방법을 사용하여 단일 분역으로 만들어 주는 것이 필수적이다^[30].

KTP와 RTA 단결정은 강유전성을 이용한 준 위상정합 소자로서의 이용 가능성으로 인해 현재 큰 관심을 받고 있다^[35, 36]. 특히 준 위상정합 소자에서 사용하는 d_{33} 값이 KTP는 16.9 pm/V , RTA는 15.8 pm/V 로 아주 클 뿐만 아니라, 현재 준 위상정합 소자로 상용화되어 있는 LiNbO₃와 같이 상온에서 광굴절 손상이 일

어나지 않아 차세대 준 위상정합 소자로서 LiNbO₃를 대체할 수 있을 것으로 예상된다. RTA 단결정은 KTP에 비해 전기 전도도가 $1/100$ 에서 $1/1000$ 정도로 작기 때문에 준 위상정합 소자 제작 시 단위 두께당 인가 전압을 낮출 수 있어 훨씬 유리하다^[37].

KTP 계열 단결정들의 광학적 성질이 표 2에 비교, 정리되어 있다.

3.2. 붕산(Borate)계열 단결정

붕산 계열의 비선형 광학 단결정은 1984년 중국 후지안 물질구조 연구소 (Fujian Institute of Research on the Structure of Matter)의 첸(Chen) 교수 그룹에 의해 β -BBO(β -BaB₂O₄)가 처음 개발된 이후 LBO(LiB₃O₃), CLBO(CsLiB₃O₁₀), YCOB(YCa₄(BO₃)₃) 등이 계속 개발되면서 큰 관심 속에 많은 연구가 이루어지고 있다^[38, 39]. 붕산 계열의 비선형 광학 단결정은 극자외선 영역까지 광 투과율이 높고 레이저 광손상 문턱값이 매우 크기 때문에, 고차 조화파를 이용한 단파장 발생과 고출력 레이저의 파장변환에 사용되는 유일한 파장변환 단결정들이다.

β -BBO는 붕산 계열 중 가장 먼저 개발된 단결정으로^[40] 광학적 단축 결정이고 3m 점그룹에 속해 있다. 광투과 영역은 $189\sim 3500 \text{ nm}$ 이고 1500 nm 에서부터 410 nm 까지 폭넓은 2차 조화파 위상정합 영역을 가지고 있어, Nd:YAG 레이저의 4차 및 5차 조화파 발생이 가능하다. 1064 nm 파장에 대해서 유효 비선형 광학 계수는 유형 I 위상정합의 경우 2.06 pm/V 이고 유형 II는 1.62 pm/V 로 비교적 큰 값을 가지고 있지만, 어긋남 각도가 3.2° (유형 I), 3.99° (유형 II)로 크고 위상정합 허용각이 0.03° (유형 I), 0.046° (유형 II)로 작은 단점이 있다^[41, 42]. 그러나 레이저 광손상 문

터값이 1064 nm, 10 ns, 10 Hz의 레이저에 대해 5 GW/cm²으로 아주 높아 1064 nm 파장의 4차 혹은 5차 조화파 발생, 광 파라메트릭 발진에 의한 광대역 파장변환에 많이 응용되고 있다^[45,46]. β -BBO 단결정은 고온용계 성장법에 의해 결정 성장이 이루어지는데 성장 기간이 비교적 길고 구조적 특성으로 인해 대구경 결정을 키우는데 어려움이 있다^[45,46].

LBO도 1989년 중국의 첸 교수 그룹에 의해 개발된 단결정^[47] 광학적 쌍축 결정이고 mm2 점그룹에 속해 있다. 광투과 영역은 160~3200 nm로 지금까지 알려진 비선형 광학 결정 가운데 가장 짧은 영역까지 광투과가 가능하지만, 455 nm 이하에서는 2차 조화파와 위상정합 조건이 만족되지 않아 극자외선 영역의 파장변환은 합 주파수 방식을 이용해야 한다. LBO는 1064 nm 파장에서 유효 2차 비선형 광학 계수가 유형 I 위상정합의 경우 1.03 pm/V, 유형 II의 경우 0.92 pm/V로 β -BBO의 절반 정도이지만, 어긋남 각도가 0.4° (유형 I), 0.35° (유형 II)로 매우 작고 위상정합 허용각 또한 2.64° (유형 I), 3.2° (유형 II)로 매우 넓어 파장변환 소자로서 매우 유리하며, 온도 조절에 의한 비입계 위상정합도 가능하여 많은 응용이 이루어지고 있다^[48,49]. LBO 단결정의 레이저 광손상 문턱값은 보고된 비선형 광학 물질 중 가장 높은 9 GW/cm²(1064 nm, 10 ns, 10 Hz) 이상으로^[50], 현재 고출력 레이저의 파장변환과 극자외선 광원 개발에 가장 많이 사용되고 있다^[51-54]. LBO 단결정은 고온 용액 성장법으로 결정 성장이 이루어지는데 용액의 점성이 커서 결정 성장이 어렵고 성장 기간이 매우 긴 단점이 있었으나^[55] 최근 KAIST 비선형 광학 연구실에서 결정 성장법을 개선하여 고품질, 대구경의 LBO 단결정을 매우 빠른 시일 내에 성장시키는 데 성공하였다^[56].

CLBO는 1994년 일본 오사카 대학의 사사키(Sasaki) 교수 그룹에 의해 개발된 단결정인데 광학적 단축 결정으로 42m 점그룹에 속해 있다^[57]. CLBO의 광투과 영역은 180~2750 nm로 β -BBO와 LBO의 중간 정도이고 2차 조화파 위상정합이 474 nm까지 가능하다. 따라서 1064 nm 파장에 대해 두 번의 연속적인 2차 조화파 발생과 합 주파수 발생을 통해 Nd:YAG 레이저의 4차 및 5차 조화파를 발생시킬 수 있다. 유효 2차 비선형 광학 계수는 0.95 pm/V(유형

I 위상정합)이고 어긋남 각도는 1.78°로 LBO보다 약간 크나 β -BBO보다는 작은 값을 가진다. 위상정합 허용 각은 0.06°로 비교적 작은 값을 가지고 있으나, 레이저 광손상 문턱값이 1064 nm, 1 ns, 10 Hz의 레이저에 대해서 26 GW/cm²로 매우 큰 값을 갖는다^[58,59]. CLBO는 과냉각법(supercooling method)으로 대구경의 단결정을 수일 내의 단 시간에 성장시킬 수 있어 다른 비선형 광학 결정에 비해 대량 생산이 훨씬 용이하다는 장점을 가지고 있다^[60]. 그러나 CLBO는 흡수성이 강하여 대기 중에 노출 시 수분을 흡수하여 결정의 표면 및 내부가 쉽게 손상을 입는 단점이 있어, 파장변환 소자로 사용 시 반드시 밀폐시킨 셀(cell) 안에서 사용할 필요가 있다.

YCOB도 1997년 일본 오사카 대학의 사사키 교수 그룹에서 개발된 비선형 광학 물질로 광학적 쌍축 결정이고 monoclinic 구조로 m 점그룹에 속해 있다^[61]. 광투과 영역은 210~2500 nm이고 2차 조화파 위상정합 가능 최단 파장이 720 nm로 β -BBO, LBO, CLBO보다 그 한계가 훨씬 높다. 유효 비선형 광학 계수는 0.52 pm/V로 위의 세 물질보다 작고, 어긋남 각도는 0.48°로 매우 작다. YCOB는 초크랄스키(Czochralski) 성장법으로 성장이 가능하므로 고품질, 대구경의 단결정을 빠른 시일 내에 성장시킬 수 있어 대량 생산이 가능하며, neodymium과 같은 레이저 활성화 이온을 첨가시켜 자발적 이차 조화파 발생이 가능하다. 또한 yttrium 성분의 일부를 gadolinium으로 대체하면 상온에서도 비입계 위상정합이 가능하다는 장점이 있다^[62]. 그러나 YCOB는 물리적 충격에 약하고 상온에서 쉽게 gray tracking과 같은 광손상을 입는 단점이 있다^[63].

3.3. 니오븀산(Niobate) 계열

LiNbO₃는 가장 대표적인 비선형 광학 단결정으로 광학적 단축 결정이고 3m 점그룹에 속해 있는 강유전성 물질이다^[64]. 광투과 영역이 400~5000 nm로 매우 넓고, 가장 큰 비선형 광학 계수 d₃₃이 41.7 pm/V로 매우 큰 값을 가지고 있어 주기적으로 분극 반전을 시켜 제작된 준 위상정합 소자가 현재 실용화되고 있다^[65]. 또한 LiNbO₃는 초크랄스키법으로 결정성장이

빛의 연금술을 실현시키는 파장변환 비선형 광학 단결정

표 3. 대표적 파장변환 비선형 광학 단결정의 특성

	KTP	RTA	KNbO3	LBO	β -BBO	CLBO
Transparency(nm)	350~4500	350~5800	400~5500	160~3200	189~3500	180~2750
d _{eff} (pm/V)	3.23 (II)	0.38 (I)	15.2 (I)	1.03 (I)	2.06 (I)	0.95 (II)
Walk-off angle	0.26° (II)	1.85° (I)	2.5° (I)	0.4° (I)	3.2° (I)	1.78° (II)
Acceptance angle	2.52°	0.5°	0.013°	2.64°	0.03°	0.06°
Laser damage threshold* (GW/cm ²)	0.45	0.40	0.25	9	5	26†
OPO spectrum (nm)	600~1060, 1060~4300 (532 nm pump)	590~960, 1190~5300 (532 nm pump)	590~1060, 1060~5500 (532 nm pump)	400~550, 1000~3200 (355 nm pump)	400~600, 600~3500 (355 nm pump)	400~710, 710~2700 (355 nm pump)

* Nd:YAG laser, 1064 nm, 10 ns, 10 Hz

† Nd:YAG laser, 1064 nm, 1 ns, 10 Hz

()안의 로마 숫자는 위상정합의 유형을 의미함.

가능하여 대구경, 고품질의 단결정을 대량 생산하고 있다. 그러나 LiNbO₃는 가장 큰 비선형 광학 계수인 d₃₃를 각도 위상정합에 사용하지 못하고 그보다 훨씬 작은 d₃₁(4.64 pm/V)을 사용해야 하며, 위상정합에 대한 온도 허용폭도 0.7°C로 매우 작은 단점이 있다. 상온에서 준 위상정합 소자로 사용 시에도 레이저의 세기가 강하면 광굴절 효과에 의한 광손상이 쉽게 발생하기 때문에 수 mW 이상의 출력광을 얻는데 많은 어려움이 있다^[66]. 이와 같은 LiNbO₃에서의 문제점을 해결하기 위해 MgO를 결정에 첨가하거나^[67] 파장변환 소자의 온도를 150°C 이상으로 올려서 사용하고 있지만 이로 인해 새로운 문제점이 발생한다. LiTi₂O₆는 체적 상태에서 2차 조화파 발생 위상정합 조건을 만족시킬 수 없지만, 준 위상정합을 이용하면 상온에서 광굴절 손상 효과 없이 고효율의 이차 조화파를 발생시킬 수 있고, Nd 등 다른 이온의 첨가가 가능하여 앞으로 준 위상정합 소자로서 LiNbO₃를 대체할 수 있을 것으로 기대되거나 고품질 단결정 성장이 어려운 단점이 있다^[68].

KNbO₃는 상온에서 강유전성을 갖는 광학적 쌍축 결정으로 orthorhombic 구조이며 mm2 점그룹에 속해 있다^[69]. 광투과 영역이 400~4000 nm로 비교적 넓고 1064 nm에서는 유형 I의 위상정합만 가능한데 그 때 유효 2차 비선형 광학 계수는 15.2 pm/V, 어긋남 각도는 2.5°로 무기물질 중에서는 가장 큰 유효 비선형 광학 계수값을 가지고 있다. 하지만 위상정합 각도 허용폭이 0.013°로 매우 좁고 온도 허용폭도 0.7°C

로 매우 좁아 파장변환 소자로서 사용 시 어려움이 많다^[70]. 온도 조절에 의해 비임계 위상정합이 가능하며, 강유전 분역을 이용한 준 위상정합 소자의 제작도 가능하다^[71]. 그러나 단결정 성장이 어렵고 성장 후 다분역 구조를 형성하기 때문에 전기적 폴링 방법에 의해 단일 분역으로 만들어야 하는 단점이 있어 실용화는 거의 이루어지지 않고 있다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 파장변환 단결정들의 특성이 표 3에 예시되어 있다.

4. 파장변환용 비선형광학 단결정 성장기술

파장변환용 비선형 광학 무기단결정 물질의 공통점은 주로 산화물(oxide)로서 녹는 온도가 비교적 높은 편이다. 따라서 용제(flux)를 사용하여 용융점을 낮추어 결정을 성장시키는 고온 용제 성장법이 가장 많이 사용되며, 그 외에 초크랄스키(Czochralski)법, 과냉각(Supercooling)법 등이 아울러 사용된다. 고품질 단결정을 대량 생산하기 위해서는 초크랄스키 법이 유리하지만, 현재 LiNbO₃, LiTiO₃, BBO만이 이 방법으로 결정성장이 가능하다.

4.1. 고온 용제 성장법 (High temperature flux growth method)^[72]

이 방법은 높은 용융점을 갖는 물질에 대해 적당한

용제(flux)를 용매로 사용하여 비교적 다루기 쉬운 1000°C 혹은 그 이하의 온도로 용융점을 낮추어 포화



그림 7. 고온 용제법으로 성장시킨 KNbO₃ 단결정

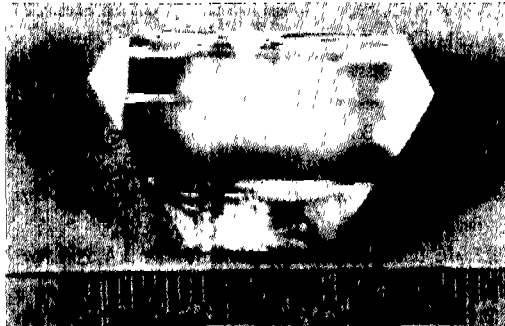


그림 8. 고온 용제법으로 성장시킨 RTA 단결정

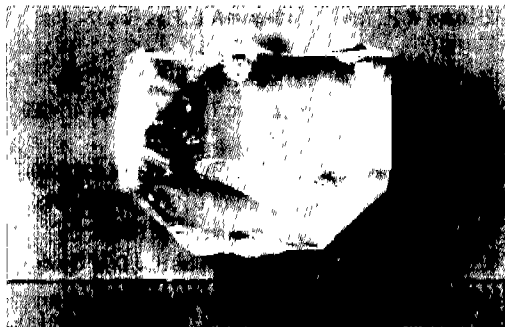


그림 9. 고온 용제법으로 성장시킨 LBO 단결정

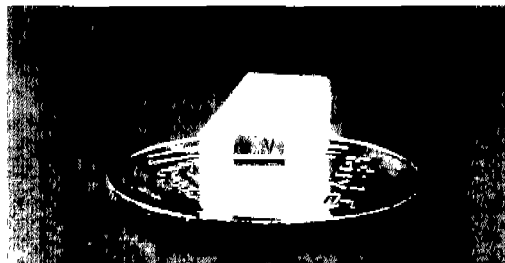


그림 10. 고온 용제법으로 성장시킨 LBO 단결정을 이용한 2차 조화파 발생 소자(5×5 mm²)

용액을 만든 후 온도강하법, 온도구배법, 용제증발법 등을 사용하여 결정을 성장시키는 방법이다. 온도강하법에서는 온도 강하율 dT/dt , 용매증발법에서는 용제의 증발을 dV/dt , 온도구배법에서는 더운 부분과 찬 부분의 온도차 ΔT 에 의해 결정 성장 속도가 조절된다. 용매증발법은 폐용기의 구멍크기에 의해 증발률을 조절할 수 있는데, 일정한 온도에서 결정성장을 하기 때문에 온도가 내려가면서 상전이를 하는 물질에 특히 유리하다.

용제법의 장점은 거의 모든 물질에 대하여 적절한 용매를 발견할 수 있기 때문에 광범위한 종류의 물질에 대해 사용할 수 있다. 반면 용매에 포함된 불순물이 결정에 끼어들거나, 용매 자체가 결정에 포유물(inclusion)로 작용할 가능성으로 인하여, 결정의 순도는 용융 성장법보다 떨어진다.

용제방법의 결정성장은 산업용과 연구용으로 널리 이용되고 있는데 특히 새로운 물질의 단결정 성장에 유용하다. 현재 BBO, LBO, KNbO₃, KTP, KTA, RTA 등의 비선형 광학 단결정 성장에 성공적으로 사용되고 있다. KAIST 물리학과와 비선형 광학 연구실에서 고온 용제 성장법으로 성장시킨 KNbO₃ 단결정(그림 7), RTA 단결정(그림 8), LBO 단결정(그림 9)과 LBO 단결정을 이용한 비임계 위상정합 2차 조화파 발생 소자(그림 10)가 아래에 예시되었다.

4.2. 초크랄스키법(Czochralski method)⁷⁵⁾

초크랄스키법은 물질을 용융시킨 후 종자결정(seed)을 용융액의 표면에 접촉시킨 후 서서히 위로 끌어올리며 단결정을 성장시키는 방법이다. 초크랄스키법은 결정과 액체의 경계면에서 열전달이 결정성장의 기본 기작으로 작용한다. 초크랄스키법은 이미 반도체 실리콘 단결정 성장에 성공적으로 사용되어 오고 있으며, 고품질 단결정의 대량 생산에 매우 유리한 기술이다.

이 방법을 사용하여 고품질의 대구경 LiNbO₃, LiTaO₃가 생산되고 있고, 지금까지 고온용제법에 주로 의존했던 BBO 단결정을 일본의 NEC사 연구소에서 초크랄스키 방법으로 성장시키는데 성공함으로써 고품질 BBO의 대량 생산 가능성을 보여 주었던 단결

빛의 연금술을 실현시키는 파장변환 비선형 광학 단결정

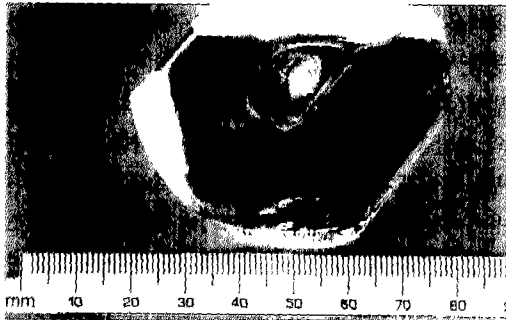


그림 11. 과 냉각법으로 성장시킨 CLBO 단결정

정의 품질은 고온용제법으로 성장시킨 결정에 미치지 못하고 있다⁷⁴⁾.

4.3. 과 냉각법(Supercooling method)

과 냉각법은 물질을 용융시켜 종자결정을 용융액 표면이나 내부에 담근 후 온도강하 혹은 일정한 과냉각 상태를 유지하며 결정을 성장시키는 방법이다. 과냉각법은 과냉각, ΔT 가 크면 외부 충격에 의해 쉽게 자발 핵생성이 되어 큰 결정을 키울 수가 없고 ΔT 가 작으면 단결정 성장속도가 매우 느리므로 최적의 과냉각 상태를 발견하는 것이 매우 중요하다. 이 방법으로 성장시키기 위해서는 물질이 용융점 이하에서도 액체상태로 존재할 수 있는 과냉각 온도 범위를 확보하여야 한다. 아주 순수한 물질보다는 불순물이 약간 포함된 물질이 넓은 과냉각 온도 범위를 갖게 되며, 이 경우 결정을 성장시키더라도 성장과정에서 불순물이 배척되기 때문에 성장된 단결정은 높은 순도를 유지할 수 있다. 과냉각법에서는 종자결정을 강제로 냉각시키지 않는다는 점이 Kyropoulos법과 다르다. 이 방법은 CLBO 단결정 성장에 성공적으로 사용되고 있다. 아래에 KAIST 물리학과와 비선형 광학 연구실에서 과 냉각법으로 성장시킨 CLBO 단결정이 그림 11에 예시되었다.

5. 요약

레이저 파장변환용 비선형 광학 단결정의 수요는 21세기 정보산업 시대를 맞이하여 정보통신, 의료, 물

질공정, 연구개발, 계측, 국방 등 다양한 분야에서 기하급수적으로 증가할 전망이다. 이에 따른 수요를 충족시키기 위해 새로운 고품질 대구경 단결정 성장 방법의 개발과, 획기적으로 향상된 기능을 갖는 새로운 파장변환용 비선형 광학 단결정의 개발이 요구된다.

참고 문헌

- [1] Boyd R. W., *Nonlinear Optics* (Academic, San Diego, 1992).
- [2] Sutherland R. L., *Handbook of Nonlinear Optics* (Marcel Dekker, New York, 1996).
- [3] Eimerl D., *IEEE J. Quantum Electron.* QE-23, 575 (1987).
- [4] Tang C. L., Bosenberg W. R., Ukachi T., Lane R. J., and Cheng L. K., *Proc. IEEE* 80, 365 (1992).
- [5] Stegeman G. I., Hagan D. J., and Torner L., *Opt. Quantum Electron.* 28, 1691 (1996).
- [6] Burzynski R., Casstevens M. K., Zhang Y., and Ghosal S., *Opt. Eng.* 35, 443 (1996).
- [7] Brown A. J. W., Bowers M. S., Kangas K. W., and Fisher C. H., *Opt. Lett.* 17, 109 (1992).
- [8] Armstrong J. A., Bloembergen N., Ducuing J., and Pershan P. S., *Phys. Rev.* 127, 1918 (1962).
- [9] Boyd G. D., Ashkin A., Dziedzic J. M., and Kleinman D. A., *Phys. Rev.* 137, A1305 (1965).
- [10] Eimerl D., Auerbach J. M., Barker C. E., Milam D., and Milonni P. W., *Opt. Lett.* 22, 1208 (1997).
- [11] Reid S. A. and Tang Y., *Appl. Opt.* 35, 1473 (1996).
- [12] Louisell W. H., Yariv A., and Siegman A. E., *Phys. Rev.* 124, 1646 (1961).
- [13] Kroll N. M., *Phys. Rev.* 127, 1207 (1962).
- [14] Zumsteg F. C., Bierlein J. D., and Gier T. E., *J. Appl. Phys.* 47, 4980 (1976).
- [15] Bierlein J. D. and Vanberzele H., *J. Opt. Soc. Am. B* 6, 622 (1989).
- [16] Cheng L. T., Cheng L. K., and Bierlein J. D., *SPIE* 1863, 43 (1993).
- [17] Yao J. Q. and Fahlen T. S., *J. Appl. Phys.* 55, 65 (1984).
- [18] Bolt R. J., van der Mooren M. H., and de Haas H., *J. Cryst. Growth* 114, 141 (1991).
- [19] Loiacono G. M., Loiacono D. N., Zola J. J., Stolzenberger R. A., McGee T., and Norwood R. G., *Appl. Phys. Lett.* 61, 895 (1992).
- [20] Mayo S. C., Thomas P. A., Teat S. J., Loiacono G. M., and Loiacono D. N., *Acta Cryst.* B50, 655 (1994).
- [21] Isaenko L. I., Merkulov A. A., Tjurikov V. I., Atuchin V. V., Sokolov L. V., and Trukhanov E. M., *J. Cryst. Growth* 171, 146 (1997).
- [22] Oseledchick Y. S., Belokryz S. P., Osadchuk V. V., Prosvirnin A. L., Selevich A. F., Starshenko V. V., and Kuzemchenko K. V., *J. Cryst. Growth* 125, 639 (1992).
- [23] Han J., Liu Y., Wang M., and Nie D., *J. Cryst. Growth* 128, 864 (1993).
- [24] Risk W. P. and Loiacono G. M., *Appl. Phys. Lett.* 69, 311 (1996).
- [25] Powers P. E., Tang C. L., and Cheng L. K., *Opt. Lett.* 19, 1439

- (1994).
- [26] Fenimore D. L., Schepler K. L., Zelmon D., Kück S., Ramabadran U. B., Von Richter P., and Small D., *J. Opt. Soc. Am. B* 13, 1935 (1996).
- [27] Reid D. T., Ebrahimzadeh M., and Sibbett W., *J. Opt. Soc. Am. B* 12, 2168 (1995).
- [28] Pfister O., Mürzt M., Wells J. S., Hollberg L., and Murray J. T., *Opt. Lett.* 21, 1387 (1996).
- [29] Cheng L. K., Cheng L. T., Galperin J., Morris Hotsenpiller P. A., and Bierlein J. D., *J. Cryst. Growth* 137, 107 (1994).
- [30] Bierlein J. D., Ferretti A., Brixner L. H. and Hsu W. Y., *Appl. Phys. Lett.* 50, 1216 (1987).
- [31] CLEO '94, Technical Digest 8, 414, CFF1 (1994).
- [32] Dmitriev V. G., Gurzadyan G. G., and Nikogosyan D. N., *Handbook of Nonlinear Optical Crystals*, Springer series in optical sciences, Vol. 64 (Springer-Verlag, Berlin, 1997).
- [33] El Haidouri A., Durand J., and Cot L., *Mat. Res. Bull.* 25, 1193 (1990).
- [34] Nordborg J., Svensson G., Bolt R. J., and Albertsson J., *J. Cryst. Growth* 224, 256 (2001).
- [35] Rosenman G., Skliar A., Eger D., Oron M., and Katz M., *Appl. Phys. Lett.* 73, 3650 (1998).
- [36] Hu W., Thomas P. A., Webjorn J., and Loiacono G. M., *J. Phys. D* 29, 1681 (1996).
- [37] Yang Y., and Yoon C. S., *Appl. Phys. Lett.* 75, 1164 (1999).
- [38] Becker P., *Adv. Mat.* 10, 979 (1998).
- [39] Sasaki T., Mori Y., Yoshimura M., Yap Y., and Kamimura T., *Mat. Sci. Eng. R* 30, 1 (2000).
- [40] Chen C., Wu B., Jiang A., and You G., *Sci. Sin. Ser. B* 28, 235 (1985).
- [41] Nikogosyan D. N., *Appl. Phys. A* 52, 359, 368 (1991).
- [42] Eimerl D., Davis L., and Velsko S., *J. Appl. Phys.* 62, 1968 (1987).
- [43] Gloster L. A. W., Jiang Z. X., and King T. A., *IEEE J. Quantum Electron.* 30, 2961 (1994).
- [44] Cheng L. K., Bosenberg W. R., and Tang C. L., *Appl. Phys. Lett.* 53, 175 (1988).
- [45] Cheng L. K., Bosenberg W., and Tang C. L., *J. Cryst. Growth* 89, 553 (1988).
- [46] Gualtieri D. M., Chai B. H. T., and Randles M. H., *J. Cryst. Growth* 97, 613 (1989).
- [47] Chen C. T., *J. Opt. Soc. Am. B* 6, 616 (1989).
- [48] Nikogosyan D. N., *Appl. Phys. A* 58, 1818 (1994).
- [49] Ebrahimzadeh M. and Ferguson A. I., *Appl. Phys. Lett.* 60, 1421 (1992).
- [50] Furukawa Y., Sato M., Markgraf S. A., Yoshida H., and Sasaki T., *SPIE* 2379, 245 (1994).
- [51] Stevensun T. R., Colville F. G., Dunn M. H., and Padgett M. J., *Opt. Lett.* 20, 722 (1995).
- [52] Kato K., *IEEE J. Quantum Electron.* 26, 2043 (1990).
- [53] Huang J. Y., Shen T. R., Chen C. T., and Wu B., *Appl. Phys. Lett.* 58, 1579 (1991).
- [54] Davis G. M., Zhang L., Chandler P. J., and Townsend P. D., *J. Appl. Phys.* 79, 864 (1996).
- [55] Shuqing Z., Chaoen H., and Hongwi Z., *J. Cryst. Growth* 99, 805 (1990).
- [56] Kim J. W., Yoon C. S., and Gallagher H. G., *J. Cryst. Growth* 222, 760 (2001).
- [57] Mori Y., Kuroda I., Nakajima S., Sasaki T., and Nakai S., *Appl. Phys. Lett.* 67, 1818 (1995).
- [58] Sasaki T., Kuroda I., Nakajima S., Watanabe S., Mori Y., and Nakai S., *Adv. Solid State Lasers* 24, 91 (1995).
- [59] Ryu G., Yoon C. S., Han T. P. J., Gallagher H. G., *J. Cryst. Growth* 191, 492 (1998).
- [60] Mori Y., Kuroda I., Nakajima S., Sasaki T., and Nakai S., *J. Cryst. Growth* 156, 307 (1995).
- [61] Iwai T., Kobayashi M., Furuya H., Mori Y., and Sasaki T., *Jpn. J. Appl. Phys.* 36, L276 (1997).
- [62] Furuya H., Yoshimura M., Kobayashi T., Murase K., Mori Y., and Sasaki T., *J. Cryst. Growth* 198/199, 560 (1999).
- [63] Furuya H., Nakao H., Ruan Y. F., Yoshimura M., Mori Y., and Sasaki T., *Proceedings of the Conference on Advanced Solid State Lasers*, WB3, p. 294 (2000).
- [64] Shur V. Y. and Romyantsev E. L., *Phy. Solid State* 41, 1681(1999).
- [65] Choy M. M. and Byer R. L., *Phys. Rev. B* 14, 1693 (1976).
- [66] Shur V. Y. and Romyantsev E. L., *Phy. Solid State* 41, 1681(1999).
- [67] Harada A. and Nihai Y., *Appl. Phys. Lett.* 69, 2629 (1996).
- [68] Yamamoto K., Mizuuchi K., and Tanuuchi T., *Opt. Lett.* 16, 1156 (1991).
- [69] Matthias B. T. and Remeika J. P., *Phys. Rev.* 82, 727 (1951).
- [70] Uematsu Y., *Jpn. J. Appl. Phys.* 13, 1362 (1974).
- [71] Meyn J. P., Klein M. E., Woll D., and Wallenstein R., *Opt. Lett.* 24, 1154 (1999).
- [72] Arend H. and Hulliger J., *Crystal Growth in Science and Technology* (Plenum Press, New York, 1989) pp.133-142.
- [73] Pamplin B. R. (ed), *Crystal Growth* (Pergamon Press, 1980) pp.273-300.
- [74] Kouta H., Imoto S., and Kuwano Y., *J. Cryst. Growth* 128, 938 (1993).

약 력

윤춘섭

근 무 저 . 한국과학기술원
 최종학력 영국 Strathclyde대학, 고체물리학 전공 (박사)
 주요경력 영국 Strathclyde대학, Research Fellow
 KAIST, 물리학과 교수
 e-mail : csyoon@mail.kaist.ac.kr
