

Bi 첨가 알루미늄실리케이트 유리에서 Li 및 Ge 공첨가가 광 특성에 미치는 영향

서영석[†]

한국원자력연구원 양자광학기술개발센터
☎ 305-353 대전시 유성구 덕진동 150

(2007년 4월 16일 받음, 2007년 6월 18일 수정본 받음)

근적외선에서 발광하는 새로운 증폭 매질인 Bi 첨가 알루미늄실리케이트 유리의 용융 온도를 낮추면서도 증폭 특성이 향상될 수 있도록 금속 산화물을 첨가한 샘플을 제작하여 분광학적 특성을 분석하였다. Li₂O의 조성비가 증가하면 형광스펙트럼의 반폭치는 증가하지만 형광 강도가 저하되고, GeO₂의 영향으로는 반폭치와 형광 강도가 동시에 증가하였다. GeO₂를 첨가한 시료에서 광 증폭 특성을 측정할 결과, 이전의 벌크 샘플에서 얻었던 것보다 우수한 증폭 특성을 가지고 있음을 확인하였다.

주제어 : Silica, Fiber material, Optical amplifiers

I 서 론

정보통신의 근간이 광섬유에 의한 광통신으로 바뀌면서 우수한 품질의 통신이 가능하도록 주변기술의 확대 개발이 요구되고 있다. 특히, 실리카 유리를 기초로 하는 광 증폭 매질은 광 신호의 장거리 전송에서 발생하는 왜곡을 보상해 주는 광섬유 증폭기와 초대형/고가의 벌크 레이저를 대신 할 수 있는 소형/고출력의 광섬유 레이저에 응용될 수 있어서 많은 연구가 이루어지고 있다. 1980년대 중반 이후 본격적으로 등장한 희토류 원소 첨가 실리카 광섬유, 특히 Er 첨가 광섬유 증폭기(EDFA: Er-doped fiber amplifier)는 광섬유의 최저 손실영역인 1550 nm 파장영역에서 동작이 가능하여 활발히 연구 개발이 진행되어 있다. 최근에는 EDFA가 범용화 되어 대용량 광 전송 기술에 활용이 되고 있으며, C-밴드 및 L-밴드 EDFA의 이득 영역을 거의 모두 활용하는 단계에 이르렀다.^[1]

최근, 광 대역 통신망을 구축하기 위하여 EDFA의 파장영역 이외에 다른 파장영역을 활용하는 광섬유 증폭기의 연구가 활발히 진행되어, 1300 nm 파장영역의 Pr 첨가 광섬유 증폭기(PDFFA: Pr-doped fluoride fiber amplifier), 1400 nm 파장영역의 Tm 첨가 광섬유 증폭기(TDFA: Tm-doped fiber amplifier) 그리고 1600 nm 파장영역의 Pr 첨가 셀레나이드 광섬유 증폭기(PDSFA: Pr-doped selenide fiber amplifier) 등에 대한 연구와 개발이 진행되고 있다.^[2-4] 당분간은 C-밴드, L-밴드 EDFA가 큰 비중을 차지할 것으로 전망되고 있지만, 광 대역 통신망 구축을 위하여 광섬유의 통신가능 파장 영역인 1250~1650 nm 전체에 대한 하이브리드형 광섬유 증폭기의 연구가 활기를 띠 것으로 전망된다.^[5,6]

한편, PDFFA는 EDFA가 증폭할 수 없는 파장영역인 1300 nm 영역을 증폭 할 수 있다는 장점에도 불구하고 제작과 활

용에는 상대적으로 고가의 제조비용과 큰 출력을 요하는 펄프 레이저가 필요할 뿐만 아니라 실리카 유리를 기반으로 하지 않기 때문에 융착 접착이 어렵다는 단점이 있다. 또한, 광섬유 라만 증폭기의 경우에는 상대적으로 증폭효율이 낮고, 고출력의 반도체 레이저가 필요하다는 단점이 존재한다.

본 연구실에서 개발된 Bi 첨가 알루미늄실리케이트 유리(BiSG: Bi-doped aluminosilicate glass)는 이와 같은 단점들을 극복 할 수 있는 광학적으로 특성이 우수한 새로운 광 증폭 매질이며, 희토류 원소를 첨가하는 기존의 광섬유 증폭기의 증폭 매질과는 전혀 다른 새로운 형태의 제작 특성을 가지고 있다. BiSG는 400~800 nm에 걸친 가시광 영역에서 흡수를 보이고 근적외선 영역인 1000~1600 nm에서 광대역의 형광을 보인다는 것이 특징이다.^[7] 이것은 Bi가 첨가된 결정이나 유리에서 보고되었던 Bi³⁺에 의한 가시광 영역에서의 발광과는 큰 차이가 있다.^[8,9]

BiSG의 근적외선 형광에 대한 메커니즘은 아직 논의 단계에 머물러 있지만, 본 연구 그룹에서는 근적외선 형광에 대한 메커니즘을 밝히기 위하여 ²⁷Al 핵자기공명(NMR: nuclear magnetic resonance), Bi L_{III} X-선 흡수 미세구조(XAFS: X-ray absorption fine structure) 그리고 X-선 흡수 끝머리 미세구조(XANES: X-ray absorption near the edge structure) 등의 계측으로부터 이를 분석하고 있다. 최근의 연구 결과에 따르면, BiSG에는 Bi³⁺와 Bi⁵⁺가 혼재되어 있어서 가시광 영역에서의 흡수에 기여하며, 알루미늄 산화물의 성분비에 따라 Bi³⁺와 Bi⁵⁺의 비가 민감하게 변화되는데 Bi⁵⁺는 알루미늄 산화물의 성분비에 반비례한다는 것을 알 수 있었다. 또한, Bi⁵⁺가 BiSG에서의 근적외선 형광의 근원이며, Bi 이온과 Al 이온의 커플링 효과에 의한 발광체 형성에 대해서 보고하였다.^[10,11] 최근, 우리는 벌크 형태의 BiSG에서 800 nm 파장의 레이저 다이오드(LD)를 여기광으로 하여 1300 nm의 신호광을 증폭하는데 성공하였다.^[12,13]

상대적으로 저가인 실리카 유리를 기반으로 하는 BiSG를

[†] E-mail: physys@kaeri.re.kr

코어 매질로 하여 광섬유를 제작하고, 800 nm 파장의 상용화된 LD를 펌프 레이저로 사용하여 영분산 파장인 1300 nm 대역에서 300 nm 이상의 광 대역 증폭이 가능한 광섬유 증폭기로 개발되면, 광 대역 통신에 있어서 EDFA에 버금가는 획기적인 연구 성과를 기대할 수 있을 것이다. 또한, 광 증폭 특성이 우수하여 고출력 광섬유 레이저의 개발에도 기여할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 본 논문에서는 광 증폭 매질로 개발된 BiSG의 기본 조성인 $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 에 용융성을 개선하고 증폭효율을 높이기 위하여 Li_2O 와 GeO_2 를 첨가하여 시료를 제작하고 분광학적 특성을 분석하였다. 또한, 800 nm의 LD를 펌프 빔으로 하여 증폭 실험장치를 구성하고, 1310 nm의 광 신호에 대한 증폭실험도 수행하였다.

II. 실험 및 토론

$\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 를 주성분으로 하는 BiSG는 가장 일반적인 유리 제법인 용융법으로 제작되었다. 제작 공정은 조제, 건조, 가소 과정을 거치고, 알루미늄이나 도가니에 넣고 전기로 안에서 1700~1750°C로 용해한 후 서냉 과정을 거치면서 완성된다. 일반적으로 실리카 광섬유의 용융 온도는 대략 1400°C 정도로 낮기 때문에 광섬유로 제작될 경우, 실리카를 기본매질로 하지만 용융 온도가 다르므로 용착 후 접촉 손실이 발생하게 된다. 그러므로 용융 온도가 낮으면서도 증폭 특성이 다르지 않는 시료를 제작하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 BiSG의 용점을 낮추고 증폭 특성이 우수한 시료를 제작하기 위해서 기본 성분 이외에 Li_2O 와 GeO_2 를 첨가하여 그 변화를 관측하였다. 기본 시료(A)의 조성비(mol %)는 $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}92\text{SiO}_2$ 로 하였고, Li_2O 를 첨가한 경우(B)는 $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}x\text{Li}_2\text{O}\text{-}(92-x)\text{SiO}_2$ ($x=1, 5, 10$)로 3종류의 시료를 제작하였다. GeO_2 를 첨가한 경우(C)에도 B와 마찬가지로 $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}x\text{GeO}_2\text{-}(92-x)\text{SiO}_2$ ($x=1, 5, 10$)의 조성비를

가지고 제작 되었다.

일반적으로 금속 산화물은 유리를 제작함에 있어서 용융성을 개선하기 위해 사용되는데, 본 실험에서 Li_2O 와 GeO_2 를 첨가한 이유는 용점 개선 이외에 다음과 같은 목적이 있었기 때문이다. 알칼리 금속 산화물인 Li_2O 의 경우는 Duffy의 광염기 이론에 따라 실리카 유리에서 그 조성이 증가함에 따라 광염기성이 증가하여 upper oxidation state가 된다고 알려져 있다.^[14] 그러므로 Bi 이온의 농도가 증가하여 적외선 발광의 강도가 증가할 것이라 예측할 수 있다. GeO_2 의 경우에는 유리의 균질성을 높이고 굴절률을 변화시키는데 유용하기 때문에 실리카 기반으로 제작되는 BiSG를 코어매질로 사용했을 때, 클래드와의 굴절률 차를 크게 할 수 있다는 장점이 있다.

제작된 시료들에 대한 분광학적 특성을 측정하기 위하여 일정한 크기(0.5×0.5×0.24 cm)로 자르고 양면을 광학 연마하였다. 준비된 시료는 적갈색을 띠고 있으며, 1300 nm 이상의 파장 영역에서 90% 이상의 투과율을 보이는데 이 결과는 그림 1을 통해서 알 수 있다. 그림 1은 U-4100 분광기(Hitachi Ltd.)를 사용하여 각 시료의 투과 스펙트럼을 측정된 결과이다. 그림에서 B와 C의 경우는 Li_2O 와 GeO_2 가 각각 5 mol %를 첨가한 시료에서 측정된 결과이다. 모든 시료에서 공통적으로 나타나는 흡수밴드는 500, 700, 800 nm에 있음을 확인할 수 있고 흡수계수의 차이는 $C > A > B$ 임을 알 수 있다. 또한, 1000~1200 nm 사이에서는 약간의 흡수가 보이는 것을 확인할 수 있지만, 영 분산 파장인 1300 nm 근처에서는 흡수가 일어나지 않고 있음을 알 수 있다.

150 W Xe 램프를 여기 광원으로 하는 SS-25 분광광도계(JASCO Corp.)를 사용하여 각 시료로부터 얻은 측정용 샘플에 대한 형광 스펙트럼을 측정하였다. 그림 2는 800 nm 여기 파장으로 하여 실온에서 측정된 각 샘플의 형광 스펙트럼을 보인 것이다. 그림 1과 마찬가지로 B와 C의 경우는 Li_2O

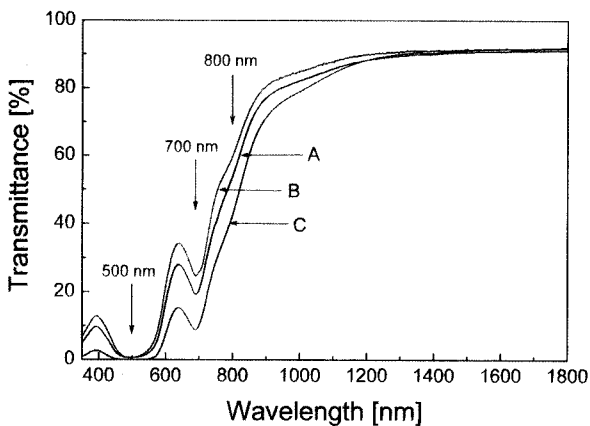


그림 1. Bi 첨가 알루미늄실리케이트 유리의 투과 스펙트럼.
 샘플 A: $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}92\text{SiO}_2$
 샘플 B: $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{Li}_2\text{O}\text{-}87\text{SiO}_2$
 샘플 C: $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{GeO}_2\text{-}87\text{SiO}_2$

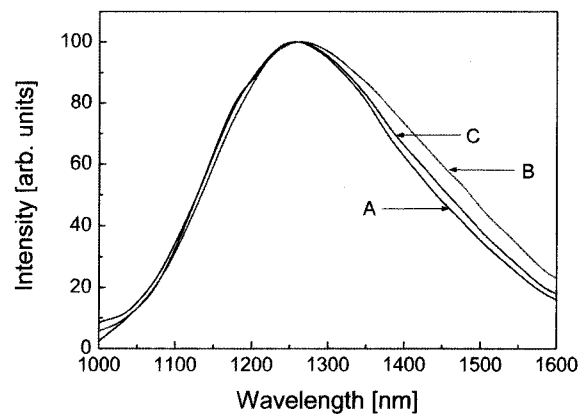


그림 2. 800 nm 여기 파장으로 하여 실온에서 측정된 Bi 첨가 알루미늄실리케이트 유리의 형광 스펙트럼.
 샘플 A: $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}92\text{SiO}_2$
 샘플 B: $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{Li}_2\text{O}\text{-}87\text{SiO}_2$
 샘플 C: $1\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-}7\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{GeO}_2\text{-}87\text{SiO}_2$

와 GeO₂가 각각 5 mol %를 첨가한 시료에서 측정된 결과이다. 각 샘플의 형광 스펙트럼은 1000~1600 nm의 적외선 파장 대역에서 나타났으며, 1263 nm (A), 1264 nm (B, C)를 첨두 파장으로 하고 있었다. 반폭치를 계산한 결과, Li₂O와 GeO₂의 영향으로 B와 C의 형광 스펙트럼은 장파장 쪽으로 넓어지면서 반폭치가 현저히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이때 A, B 그리고 C 샘플의 반폭치는 307, 350 그리고 324 nm이었다.

일반적으로 반폭치의 크기는 증폭기의 밴드 폭을 의미하므로, Li₂O와 GeO₂를 첨가하여 반폭치가 증가되는 것을 확인한 것은 중요한 의미를 가진다. 하지만 첨가한 산화물의 영향으로 형광 강도가 감소되는지 여부를 확인할 필요가 있다. 이를 위하여 준비된 각 시료로부터 형광스펙트럼의 첨두 파장에 대한 형광 강도를 측정하여 그림 3에 나타내었다. 그림 3은 Li₂O와 GeO₂의 조성비에 따른 형광 강도의 변화를 보여주는데 Li₂O의 조성비가 증가할 경우, 형광 강도가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 GeO₂의 경우에는 조성비가

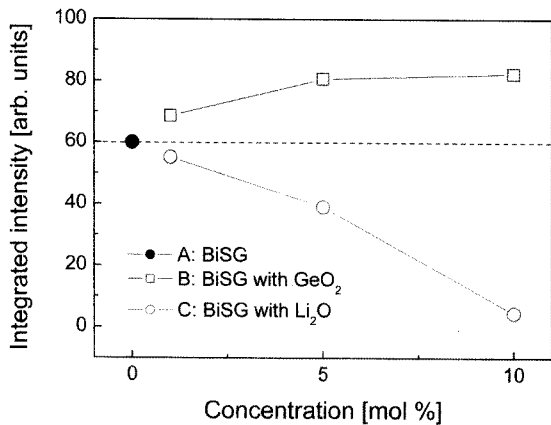


그림 3. 각 샘플의 조성비를 변화시키면서 측정된 형광스펙트럼의 첨두 파장에서의 형광 강도.

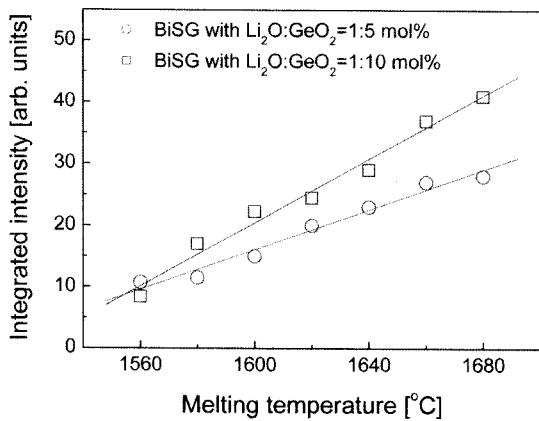


그림 4. 금속 산화물이 함유된 Bi 첨가 알루미늄노실리케이트 유리의 용융 온도의 변화.

속이 빈 원: 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-1Li₂O-5GeO₂-86SiO₂

속이 빈 사각형: 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-1Li₂O-10GeO₂-81SiO₂

증가할수록 형광강도가 증가하므로 반폭치와 더불어 BiSG의 특성을 향상시키는데 중요한 요소가 될 수 있음을 확인할 수 있다.

본 연구 그룹에서는 BiSG의 발광 원인을 Bi 이온과 Al 이온의 커플링 효과에 의한 것으로 해석하고 있는데, 알칼리 금속 산화물인 Li₂O의 조성비가 증가할수록 형광 강도가 감소되는 것은 Li₂O가 Bi 이온과 Al 이온의 커플링 효과를 붕괴시키는 것이라고 추측할 수 있다. 물론, Li₂O의 조성비가 증가할수록 형광 강도가 저하되는 것은 Duffy의 광 염기 이론에 어긋나는 실험 결과이다.^[14] 이를 해석함에 있어서 Nanba 등에 의한 최근의 연구결과를 참조하였다.^[15] Nanba 등에 따르면, 알칼리 금속 산화물(Li₂O, Na₂O, K₂O)이 함유된 다른 종류(borate, silicate, phosphate etc.)의 유리와는 다르게 Li₂O-Bi₂O₃ 유리에서는 Li₂O의 조성비가 증가함에 따라 광 염기성뿐만 아니라 O1s 결합에너지와 화학 변위가 증가한다고 보고하였다. 일반적으로 광 염기성이 증가하는 유리에서는 결합에너지가 감소하는데, Bi₂O₃가 함유된 유리에서는 Li₂O의 영향으로 인하여 정반대의 상관관계를 보인다는 것을 의미한다.

BiSG에 대한 용융 온도 변화를 관측하기 위하여 Li₂O와 GeO₂를 적절하게 혼합하여 두 종류의 샘플을 준비하였다. 준비된 샘플의 조성비는 각각 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-1Li₂O-5GeO₂-86SiO₂와 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-1Li₂O-10GeO₂-81SiO₂이다. 실험에 사용된 전기로는 복사방식으로 1700°C까지 온도를 자유롭게 증가시킬 수 있도록 주문 제작하였다. 이 장비는 적은 양의 시료를 테스트하는데 적합하게 고안되었는데, 시료를 일정한 길이로 자른 내경 2 mm의 실리카 튜브에 적당량을 채우고 알루미늄아 슝으로 밀봉하는 방법으로 시료를 준비하였다. 용융 온도를 다양하게 변화시키면서 여러 종류의 샘플을 제작하였고, 실리카 튜브 안에 형성된 BiSG 유리를 육안으로 관측한 결과, 유리화가 이루어지는 용융 온도를 1550~1600°C까지 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 이때, 각 샘플에서 측정된 형광 강도와 용융 온도와의 관계를 그림 4에 나타내었다.

그림 5는 제작된 BiSG 샘플 A, B 그리고 C의 증폭 특성을 측정하기 위한 실험 장치이다. 신호 빔으로 사용된 레이저 다이오드는 파장이 1310 nm이고 최대 출력이 5.0 mW이며,

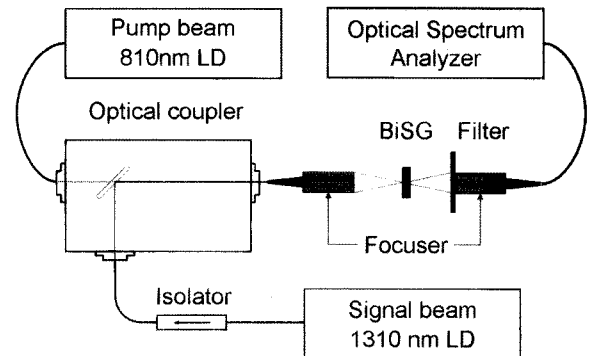


그림 5. BiSG 벌크 샘플의 증폭 실험장치의 개략도.

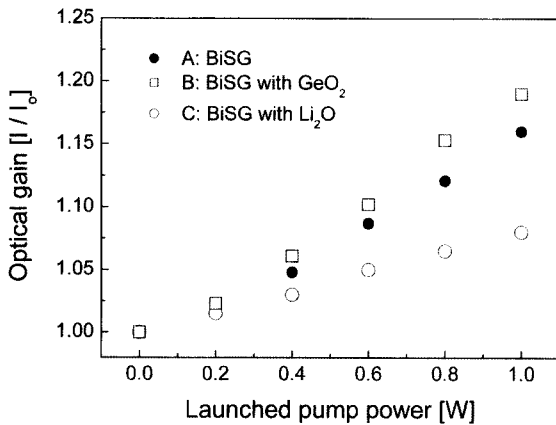


그림 6. 금속 산화물이 함유된 BiSG의 증폭 특성.
 샘플 A: 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-92SiO₂
 샘플 B: 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-5Li₂O-87SiO₂
 샘플 C: 1Bi₂O₃-7Al₂O₃-5GeO₂-87SiO₂

여기 광으로 사용된 810 nm 파장의 레이저 다이오드의 최대 출력은 2.0 W이다. 신호 빔과 여기 빔은 광 커플러를 통해 결합되고 다중모드 광섬유(MMF)로 만들어진 빔 집속 장치를 따라 샘플의 표면에 입사된다. 펌프 광의 출력을 1.0 W까지 증가시키면서 측정된 BiSG의 증폭 특성을 그림 6에 나타내었다. 각 샘플에서 증폭 특성은 펌프 광의 출력에 따라 선형적으로 증가하지만, 최대 증폭 이득을 비교해볼 때 각 샘플의 특성이 다르게 나타남을 알 수 있다.

이득 계수를 계산하기 위한 식을 $g = (1/l) \ln(I/I_0)$ 로 쓸 수 있다.^[13] 여기서 I_0 는 샘플에 입사하는 신호 빔의 강도, I 는 증폭된 신호 빔의 강도 그리고 l 은 샘플의 두께 0.24 cm를 나타낸다. 그림 6으로부터 알 수 있듯이 샘플 A의 경우, 최대 증폭 이득과 이득계수는 1.16(0.62 cm⁻¹)이며, 샘플 B와 C는 각각 1.09(0.35 cm⁻¹), 1.21(0.79 cm⁻¹)이다. 샘플 A의 경우, 2.0 W에서 1.19(0.663 cm⁻¹)의 증폭 이득을 얻었던 이전의 실험 결과와 비교해 보면 특성이 향상된 BiSG가 제작되었음을 알 수 있다.^[12] 또한, 같은 조건에서 측정된 샘플 B와 C의 경우, 형광 스펙트럼 측정에서 이미 예측된 바와 같이 Li₂O가 함유된 샘플 B는 A보다 이득 값이 적었고, GeO₂를 함유한 샘플 C에서는 A보다 이득 값이 크게 나타났다. 그러므로 광섬유의 코어매질로써 클래드와의 굴절률 차를 크게 하고 광 증폭 특성이 우수한 BiSG를 제작하기 위해서는 GeO₂의 역할이 매우 중요한 변수이다.

III. 결 론

본 논문에서는 근적외선에서 발광하는 새로운 증폭 매질인 BiSG의 용융 온도를 낮추면서도 증폭 특성이 향상될 수 있도록 금속 산화물을 첨가한 샘플을 제작하여 분광학적 특성을 분석하였다. BiSG가 완전한 실리카계의 유리로 제조되기 위해서는 SiO₂는 80 mol % 이상이어야 하므로 이를 벗어나

지 않는 범위 내에서 Bi₂O₃와 Al₂O₃의 조성비를 1:7로 일정하게 하고 Li₂O와 GeO₂의 조성비를 바꿔가면서 시료를 제작하였다. 기본 조성비를 가진 BiSG와 비교했을 때, Li₂O의 조성비가 증가하면 형광스펙트럼의 반폭치는 증가하지만 형광 강도가 저하되는 것이 확인되었고 GeO₂의 영향으로는 형광 강도가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고, Li₂O와 GeO₂를 공첨가하여 BiSG의 용융 온도를 1550~1600℃까지 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 또한 GeO₂를 첨가한 시료에서 광 증폭 특성을 측정한 결과 이전의 벌크 샘플에서 얻었던 결과보다 우수한 증폭 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 본 실험 결과를 통해 BiSG는 희토류 원소를 첨가한 근적외선 영역에서의 레이저 매질에 대응되는 열적 특성이 우수한 실리카계의 새로운 증폭 매질로서 넓은 파장 대역(1000~1600 nm)에서 응용이 가능하다는 것을 알 수 있다. 게다가 레이저 매질 뿐만 아니라 광섬유 증폭기의 코어매질로 사용하여, 일반 광섬유의 영분산 파장인 1300 nm 대역에서 증폭기로의 개발이 기대된다. BiSG의 증폭 특성을 개선하기 위해서는 초기 제작조건으로써 1750℃ 이상이었던 BiSG의 용융온도를 낮추는 것과 비스무트 산화물의 녹는점 1100℃에서 높은 증기압력으로 인한 Bi 이온의 농도를 제어하는 것이 필요하다. 이를 위해서 1가 또는 2가 금속 산화물을 첨가하는 등의 다 성분 시료의 적절한 조성비를 조사하여 적용하면 용융온도를 낮출 수 있을 것이며, Bi 이온을 시료 내에 균일하게 분포시키기 위해서는 불활성 기체 분위기에서 용해상태를 적절한 시간 동안 유지시키거나 시료를 앰플에 담아 회전시키는 방법 등을 이용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문을 위해서 실험 및 장비를 비롯하여 조언을 아끼지 않았던 일본 오사카대학, 레이저에너지학 연구 센터의 Yasushi Fujimoto와 Masahiro Nakatsuka에게 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- [1] T. J. Whitley, "A review of recent system demonstrations incorporating 1.3- μ m praseodymium-doped fluoride fiber amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 5, pp. 744-760, 1995.
- [2] Y. Ohishi, T. Kanamori, T. Kitagawa, and S. Takahashi, "Pr³⁺-doped fluoride fiber amplifier operating at 1.31 μ m," *Opt. Lett.*, vol. 16, no. 22 pp. 1747-1749, 1991.
- [3] S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, K. Kobayashi, and M. Shimizu, "Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 10, pp.1331-1333, 2002.
- [4] Y. G. Choi, B. J. Park, K. H. Kim, and J. Heo, "Pr³⁺-and Pr³⁺/Er³⁺-Doped Selenide Glasses for Potential 1.6 μ m Optical Amplifier Materials," *ETRI Journal*, vol. 23, no.

- 3, pp. 97-105, 2001.
- [5] M. Yamada, A. Mori, K. Kobayashi, H. Ono, T. Kanamori, K. Oikawa, Y. Nishida, and Y. Ohishi, "Gain-flattened tellurite-based EDFA with a flat amplification bandwidth of 76 nm," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 1244-1246, 1998.
- [6] H. Masuda, "Review of wideband hybrid amplifiers," in *Proc. OFC, Tech. Dig., Paper TuA1*, vol. 1, pp. 2-4, 2000.
- [7] Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, "Infrared luminescence from bismuth-doped silica glass," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 3B, pp. L279-L281, 2001.
- [8] S. Parke and R. S. Webb, "The optical properties of thallium, lead and bismuth in oxide glasses," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 34, pp. 85-95, 1973.
- [9] M. J. Weber and R. R. Monchamp, "Luminescence of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$: Spectral and decay properties," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, no. 12, pp. 5495-5499, 1973.
- [10] Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, " ^{27}Al NMR structural study on aluminum coordination state in bismuth doped silica glass," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 352, pp. 2254-2258, 2006.
- [11] T. Ohkura, Y. Fujimoto, M. Nakatsuka, and Y.-S. Seo, "Local structures of bismuth ion in bismuth doped silica glasses analyzed by using Bi L_{III} X-ray absorptions fine structure," *accepted to be published in J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 90, 2007.
- [12] Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, "Optical amplification in bismuth-doped silica glass," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 19, pp. 3325-3327, 2003.
- [13] Y.-S. Seo, Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, "Optical amplification in a bismuth-doped silica glass at 1300 nm telecommunications window," *Opt. Commun.* vol. 266, no. 169, pp. 169-171, 2006.
- [14] J. A. Duffy, "Redox equilibria in glass," *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 196, pp. 45-50, 1996.
- [15] T. Nanba, Y. Miura, and S. Sakida, "Consideration on the correlation between basicity of oxide glasses and O1s chemical shift in XPS," *Journal of the ceramic Society of Japan*, vol. 113, no. 1, pp. 44-50, 2005.

Optical Characteristics of Bismuth-doped Aluminosilicate Glass Codoped with Li and Ge

Young-Seok Seo[†]

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Dukjin-dong, Yuseong, Daejeon, 305-353, Rep. of Korea

[†]E-mail: physys@kaeri.re.kr

(Received April 16, 2006, Revised manuscript June 18, 2007)

The possibility of improving amplification characteristics and lowering the melting point of bismuth-doped aluminosilicate glass as a new amplification material, which has broadband near-infrared emission at 1300 nm regions, was investigated. Spectroscopic analysis of bismuth-doped aluminosilicate glass shows that the addition of an alkali metal oxide, Li_2O increases FWHM of fluorescence spectrum but decreases fluorescence intensity, while GeO_2 composition increases both FWHM of fluorescence spectrum and fluorescence intensity. Also, excellent optical amplification gain characteristics in a GeO_2 -added sample were observed.