

분광타원법을 이용한 Pr 첨가 Ge-Sb-Se 계열 셀레나이드 유리의 굴절률 결정

신상균[†] · 김상준 · 김상열

아주대학교 분자과학기술학과

Ⓣ 442-749 경기도 수원시 팔달구 원천동 산 5번지

최용규 · 박병제 · 서홍석

한국전자통신연구원 반도체 · 원천기술연구소 광통신소자연구부

Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 가정동 161번지

(2003년 7월 28일 받음, 2003년 11월 18일 수정본 받음)

1.6 μm 파장대의 U 밴드 광증폭기용 광섬유 소재인 Pr 첨가 Ge-Sb-Se 계열 셀레나이드 유리의 굴절률을 분광타원법을 이용하여 결정하였다. 시료의 광물성을 조사하기 위해 투과 파장 영역에서의 타원 스펙트럼을 Sellmeier 분산관계식에 기반한 공기/미시 거칠기층/표면층/기층으로 구성된 4상계의 모델에 적용하여 굴절률과 분산계수 및 박막구조상수를 동시에 얻을 수 있었다. 디스크 형태로 가공된 각 시료의 양면을 대상으로 위치에 따라 수회 반복 측정을 통하여 시료의 표면 거칠기의 영향을 파악함으로써 조성 변화에 대한 굴절률 변화 양상을 보다 정확히 파악하였다. 시료의 표면 거칠기가 굴절률 측정치의 편차에 주된 영향을 미쳤으나 1 몰%에 해당하는 소량의 조성변화에 따른 굴절률 변화를 신뢰할 수 있는 수준으로 결정할 수 있었다. 실험적으로 결정된 조성변화와 굴절률과의 관계식은 단일모드의 셀레나이드 광섬유 제작에 있어 코어와 클래드의 조성을 결정하는데 직접적으로 활용될 수 있다.

주제어 : spectroscopic ellipsometry, refractive index, Ge-Sb-Se based glass, U-band fiber amplifier.

I. 서 론

코어와 클래드의 계면에서 발생하는 전반사를 이용하여 빛을 전송하는 광섬유는 일반적으로 산란이나 흡수에 의하여 광손실을 나타낸다. 광통신용 실리카 광섬유는 1.5 μm 근처에서 0.2 dB/km의 낮은 광손실을 가짐에도 불구하고 전송거리가 길어짐에 따라 신호광의 세기가 전송길이에 대해 지수적으로 감소하게 된다. 따라서 약화된 광신호를 증폭하기 위해 일정 구간마다 광섬유 증폭기를 설치해야 한다. 현재 C 밴드와 L 밴드 대역에서 활용되는 어븀(Er) 첨가 실리카 광섬유 증폭기를 위시하여 S 밴드용 이온첨가 광섬유 증폭기가 활발히 연구되고 있다.^[1,2]

폭발적인 인터넷 사용자 수의 증가 및 대용량 자료의 신속한 교환에 대한 수요 급증 등에 힘입어 광전송 시스템의 용량 역시 더욱 커져야 한다. 광섬유의 전송대역폭은 전송용 광섬유에서 수산화기에 의한 흡수를 완전히 제거하거나 200 nm 이상의 파장에 걸쳐 평탄한 분산 특성을 부가하는 등의 개선을 통하여 증대될 수 있다. 이와 같은 특성 개선이 지속되면 궁극적으로 1.3~1.7 μm 대역을 모두 활용하는 수십 Tb/s급 이상의 광전송 용량을 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 기술한 바와 같이, 광섬유 증폭기는 새로운 광통신 투과창을 여는데 있어 핵심적인 역할을 하게 된다. 최근 ETRI에서는 1.6 μm 파장대인 U 밴드 광증폭기용 프라세오디뮴(Pr) 첨가 셀레

나이드 계열 광섬유 소재를 개발하였으며,^[3,4] 펌프 광원으로 이미 상용화된 고출력 1480 nm 레이저 다이오드를 그대로 사용할 수 있어서 여타 추가적인 기술 개발이 필요치 않은 장점이 있으며 다른 사소한 부품들은 기존의 기술로 용이하게 확보 가능하여 Pr 첨가 셀레나이드 광섬유의 특성이 실용화 수준까지 보완되면 향후 10 Tb/s급 이상의 대용량 광통신 시스템의 구현에 기여할 수 있으리라 전망된다.^[5,6]

잘 알려진 바와 같이, 화학증착법을 적용하여 제작하는 실리카 계열 광섬유에서는 Ge의 함량을 변화시킴으로써 코어부의 굴절률을 조절한다. 이는 Ge의 첨가로 인하여 발생하는 분극률 및 밀도 등의 미시적 및 거시적 변화에 기인하는 굴절률 변화를 활용하는 것이다. 같은 논리로, 비산화물 유리의 경우에도 조성변화를 통하여 코어와 클래드의 굴절률 차이를 유도해야 한다. 이 경우 원하는 굴절률 차이를 확보하되, 코어와 클래드의 열팽창 계수나 점도가 거의 일정하게 유지되도록 해야 한다.

본 논문에서는 분광타원법을 이용한 셀레나이드 유리의 굴절률 결정과정을 기술하고 굴절률에 미치는 시료의 표면 거칠기 및 조성의 영향을 파악하고자 하였다. 유리와 같은 덩어리 물질의 굴절률을 측정하는 대표적인 방법으로는 prism coupling 방법이 있다. 이는 대부분의 굴절계(refractometer)에서 적용하고 있는 방법으로 빛의 전반사를 이용하기 때문에 매우 정확한 방법으로 알려져 있다. 그러나 본 실험에서 측정된 Ge-Sb-Se 계열 셀레나이드 유리의 굴절률은 2.6 이상의 큰 값을 가지며, 이보다 큰 굴절률을 가지는 프리즘을 확보하는 것이 용이하지 않기 때문에 일반적인 prism coupling 방법을 적용하

[†]E-mail: bynuncle@ajou.ac.kr

기 어렵다. 덩어리 물질의 굴절률을 측정하는 또 하나의 잘 알려진 방법으로 최소 편각각(angle of the least deviation) 측정에 기초한 방법이 있다. 그러나 본 연구의 대상이 되는 유리의 단파장쪽 흡수단이 약 800 nm 부근에 위치하기 때문에 유리를 투과하는 가시광이 존재하지 않아 현재 많이 사용되는 가시광 영역의 최소 편각각 측정 장치를 활용하기 어렵다. 한편 분광타원법은 유리를 포함한 광투과 유전물질을 비롯하여 반도체, 금속 화합물 등 다양한 물질의 굴절률 또는 복소 굴절률과 박막의 두께 등 구조를 결정하는데 유용하게 활용되어 왔다.¹⁷⁻¹⁹ 특히 빛을 흡수하지 않는 유전영역의 경우 표면 거칠기를 포함하여 밀도 분포 그리고 굴절률 분산 관계식까지를 동시에 결정할 수 있으므로 여러 가지의 유전박막의 광학 특성 및 밀도 분포 등을 결정하는데 다양하게 적용되어 왔다.¹¹⁰⁻¹²¹ 그러나 대부분의 분광타원법 연구는 박막형태의 시료를 대상으로 그 구조 및 광학 물성을 분석하는데 초점이 맞추어져 왔으며 파장대역으로는 가시영역을 중심으로 하여 왔고 필요에 따라 자외선 영역이나 근적외선 영역을 추가하기도 하였다. 본 연구에서는 근적외선 영역의 분광타원법을 사용하여 Ge-Sb-Se 계열 셀레나이드 유리의 굴절률을 결정할 수 있었다.

II. 시료 제작

Ge_{29.95}Sb₁₀Se₆₀Pr_{0.05}의 기본조성에서 Ge 함량과 Sb 함량을 소량 변화시킨 디스크 형태의 Glass #1, Glass #2, Glass #3 시료를 각각 준비하였으며 표 1에 각 시료의 조성을 나타내었다.

비산화물 계열 유리는 산소나 수산화기의 유입으로 인해 광학적인 특성이나 화학적인 물성이 영향을 받기 때문에 시료를 저울로 측정할 때는 순도 99.999% 이상의 아르곤 가스로 채워진 글로브 박스 안에서 작업을 행하였으며, 이때 산소 및 수산화기의 농도는 공히 2 ppm 이하로 유지되었다. 시료의 제작과정은 다음과 같다. 5N 이상의 순도를 가지는 금속 형태의 Ge, Sb, Se, 및 Pr 출발물질을 조성별로 칭량하여 실리카 앰플에 장입한다. 이때 사용되는 비정질 실리카 앰플은 300°C에서 1 시간 이상 열처리한 후에 사용하여야 불순물을 제거할 수 있다. 후속 공정으로써 실리카 앰플 내부를 진공으로 처리한 상태에서 가열 밀봉한 후, 이 실리카 앰플을 500°C까지는 2°C/min로, 1000°C까지는 1°C/min로 승온하고 최종 온도인 1000°C에서 12 시간동안 유지하였다. 그 후 용융액이 들어있는 실리카 앰플을 상온의 물에 넣어 급속 냉각함으로써 비정질 상태의 시료를 제조하였다. 각 시료는 유리 전이온도(Tg; ~290°C) 부근에서 2시간 동안 열처리한 후 공기 중에서 냉각시켰다. 최종 분광분석용 시료는 상기 방법으로 만든 덩어리

표 1. 각 시료별 성분 조성비

Sample	Pr (mol%)	Sum of Ge, Sb, Se (mol%)	Relative concentration of Ge, Sb, Se		
			Ge (%)	Sb (%)	Se (%)
Glass #1	0.05	99.95	29	11	60
Glass #2	0.05	99.95	28	12	60
Glass #3	0.05	99.95	27	13	60

유리를 두께 1~2 mm의 디스크 형태로 절단한 후, 광학연마를 하여 준비하였다.

III. 측정 및 분석

Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 광물성을 결정하기 위해 위상 변조형 분광타원계(Spectroscopic Phase Modulated Ellipsometer, Jobin-Yvon, UVISSEL)와 분광광도계(Spectrometer, Sinco UV S-2100)를 사용하였다. 먼저 분광광도계로 투과도를 측정하여 광투과 영역을 결정하였다. 그림 1에 도시한 Ge_{28.95}Sb₁₁Se₆₀Pr_{0.05} 조성의 시료에서 측정된 투과 스펙트럼으로부터 확인할 수 있듯이, 약 800 nm부터 투과도가 급격히 커지는 것을 알 수 있다. Ge-Sb-Se 계열의 셀레나이드 유리의 단파장쪽 투과도의 위치는 조성에 따라 결정되는 평균 배위수 ~2.6을 기준으로 다소 변화가 발생하나, 본 연구에서 선택한 시료들의 조성변화는 크지 않기 때문에 평균 배위수의 차이 역시 미미하다. 따라서 분광타원법 분석을 적용한 에너지 영역에서의 투과도는 선택한 시료들 공히 큰 차이가 없다.

투과도 측정으로부터 결정된 광투과 영역에서 분광타원계를 사용하여 각 시료의 전면과 후면 및 각 면의 서로 다른 위치에 대해 각각 수회 측정하여 타원상수를 구하였으며, 이를 이용하여 전면과 후면의 차이 그리고 각 면에서의 측정 위치에 따른 차이에 의한 효과를 조사하였다. 분광타원계 측정은 입사각을 70°로 하여 0.74~1.6 eV의 대역에서 수행하였으며, 측정 데이터의 잡음을 줄이기 위해 측정시간을 1500 ms로 설정하였다. 그림 2는 분광타원계를 사용하여 측정된 Ge-Sb-Se 계열 셀레나이드 유리 시료의 Ψ, Δ 그래프이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 각 시료의 측정치가 공히 위치에 대한 의존성을 가지는 것을 확인할 수 있는데, 한 면에서의 측정 위치에 의한 차이보다 측정면이 달라질 때 발생하는 차이가 더 크게 나타났다. 시료 표면의 불균일과 위치에 따른 산란 정도의 차이가 측정치의차이를 유발하는 주된 원인으로 분석됨을 주목하면, 동일면의 표면 균일도 차이가 상이한 면에서의 표면 균일도 차이보다 작다는 것을 쉽게 확인할 수 있다.

광학상수가 알려져 있지 않은 미지박막은 굴절률 분산식을

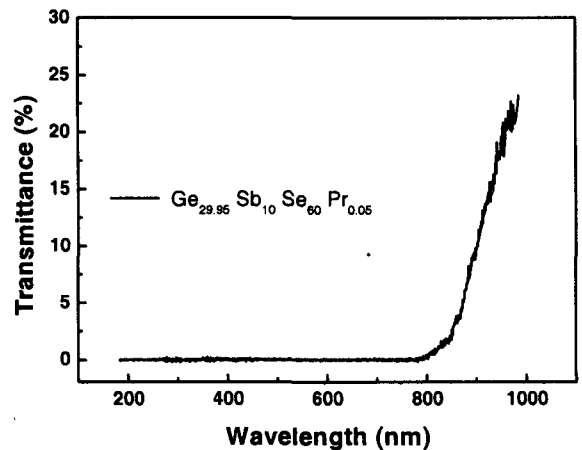


그림 1. Ge_{29.95}Sb₁₀Se₆₀Pr_{0.05} 유리 시료의 투과도.

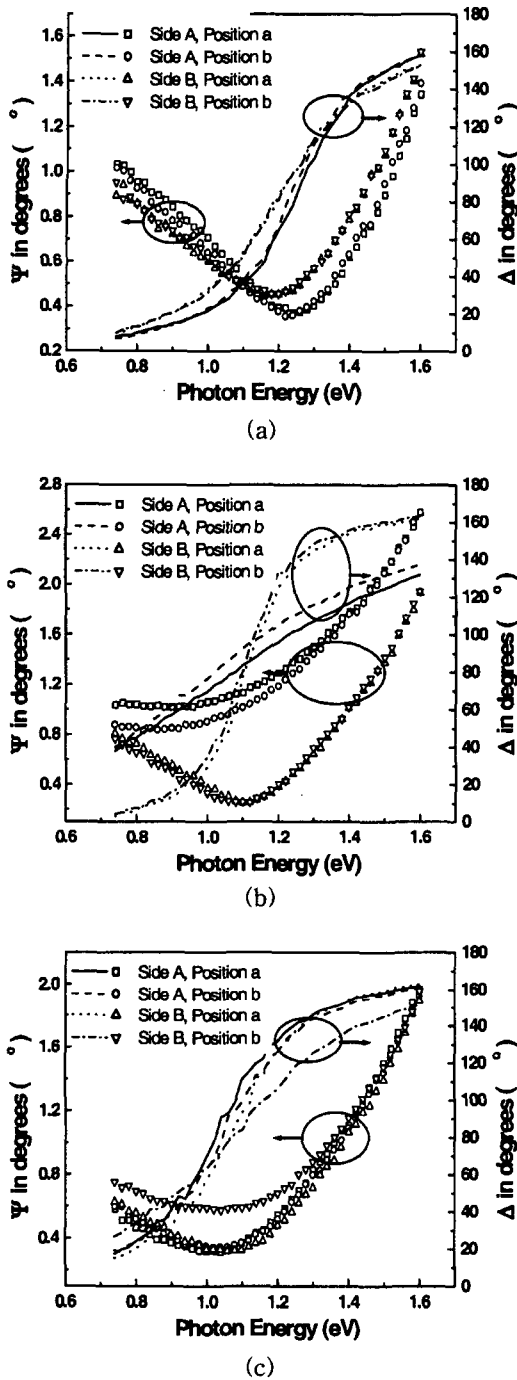


그림 2. Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 투과영역(0.74~1.6 eV)에서 측정된 타원 스펙트럼. (a) Glass #1, (b) Glass #2, (c) Glass #3.

사용하여 굴절률과 박막구조상수들을 동시에 결정하는 방법이 유용하므로 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 투과영역에서의 타원 스펙트럼 분석에는 투명한 시료에 대해 사용하는 Sellmeier 분산관계식을 사용하였다. Sellmeier 분산관계식은 아래의 식 (1)에 나타내었다.

$$n^2(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2 - \lambda_0^2}, k(\lambda) = 0 \quad (1)$$

여기에서 A, B, λ_0 는 Sellmeier 분산계수이다. 이 분산관계식에 공기/미시 거칠기층/표면층/기층의 4상계의 모델을 적용하여 굴절률, 분산계수, 박막구조상수를 동시에 결정하는 모델링 방법을 적용하였다.^[13-15]

앞에서 언급한 바와 같이 측정 위치에 대한 의존성은 위치에 따라 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 표면 거칠기가 서로 다르며, 또한 밀도 불균일성을 반영할 수 있도록 4상계 모델을 적용하였다. 즉, 모델링 방법을 적용할 때 박막, 계면, 기층 모두 성분 분포가 균일하지 않을 것으로 판단하여, 앞에서 언급한 바와 같이 측정 위치에 대한 의존성은 위치에 따라 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 표면 거칠기가 서로 다르며, 또한 밀도 불균일성을 반영할 수 있도록 4상계 모델을 적용하였다. 즉, 모델링 방법을 적용할 때 미시 거칠기층, 표면층, 기층 모두 성분 분포가 균일하지 않을 것으로 판단하여, 조성비와 성분 분포가 균일한 기층과 공기 매질로 구성된 2상계 모델보다는 유리 덩어리 시료의 표면층과 미시 거칠기층을 고려한 4상계 모델이 본 시료들에 대해 보다 효율적으로 반영하는 것으로 판단되었다.

IV. 굴절률 분석 결과

표 2는 각각의 시료에 대한 구조와 Sellmeier 분산관계식의 분산계수를 나타낸 것이다. 대체로 미시 거칠기층은 조밀도가 30% 근방이고 두께는 20 Å 정도이다. 표면층은 두께가 1000~1500 Å 정도, 조밀도는 100.1~100.5% 정도로 표면층의 밀도가 기판의 밀도보다 약간 높게 나타났다. Sellmeier 분산관계식의 분산계수들의 값은 “X”와 “Y”, 그리고 분산계수들이 최적맞춤을 실행할 때마다 계속 변하는 경우의 3개 유형으로 구분할 수 있다. 여기에서 “X” 유형은 Sellmeier 분산관계식의 분산계수인 A가 4.0, B가 2.9, λ_0 가 430 근방의 값으로 최적맞춤이 이루어진 경우를 나타내며, “Y” 유형은 A가 2.7, B가 4.2, λ_0 가 385 근방의 값으로 최적맞춤이 이루어진 경우를 나타낸다. 아래의 표 2는 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 모델링 분석 결과를 보여준다.

4.1. 분석 방법에 따른 굴절률 변화

굴절률 결정에서 발생 가능한 오차의 원인은 측정값에서 유래하는 오차, 모델링 방법에서 유래하는 오차로 대별할 수 있다. 본 시료 분석에서의 모델링 방법에서 유래하는 오차가 표현되는 과정은 분석 방법에서 기인한, 구체적으로 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료에 대한 최적맞춤 결과가 Sellmeier 분산관계식 분산계수의 유형에 따라 “X”와 “Y”의 유형 모두에서 최적맞춤이 이루어지는 경우, “X”의 유형에서만 최적맞춤이 이루어지는 경우, “Y”의 유형에서만 최적맞춤이 이루어지는 경우 및 “X”와 “Y”의 유형 모두에서 최적맞춤이 이루어지지 않는 경우로 나누어진다. 이러한 4개 유형에서 첫 번째 경우가 가장 많았으며, 분산계수가 “X” 유형의 값을 가지느냐 “Y” 유형의 값을 가지느냐에 따라 굴절률은 전파장대역에 걸쳐 약 0.003 이하의 차이를 보여준다. 단지 Glass #3의 “side B, position a”의 경우는 예외적으로 파장에 따라 굴절률이 최

표 2. Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 모델링 분석 결과. 여기서 void의 -부호는 덩어리 유리보다 표면층의 밀도가 높아 이에 따라 굴절률이 높아졌다는 것을 의미한다. (())의 유형으로도 최적맞춤이 이루어짐)

NO.	Side & Position	미시 거칠기층		표면층		Sellmeier's Coefficient			
		Void (%)	Thickness (Å)	Void (%)	Thickness (Å)	A	B	λ_0 (Å)	Type
Glass #1	A, a	72.0	14.9	-0.22	1239.9	3.983	2.850	431.9	X(Y)
	A, b	72.6	15.1	-0.27	1152.3	3.979	2.850	434.4	X(Y)
	B, a	74.0	19.0	-0.33	1200.5	4.019	2.868	425.5	X(Y)
	B, b	66.5	18.5	-0.38	1143.1	4.002	2.849	433.2	X(Y)
Glass #2	A, a	71.5	59.3	-0.18	1474.2	Parameters not fixed			
	A, b	70.6	51.9	-0.19	1352.0	Parameters not fixed			
	B, a	72.8	14.3	-0.59	1028.1	4.010	2.853	452.2	X(Y)
	B, b	73.7	13.5	-0.46	1043.8	4.044	2.871	446.4	X
Glass #3	A, a	68.7	16.9	-0.21	1189.6	4.109	2.922	443.6	X(Y)
	A, b	68.2	17.3	-0.17	1241.6	4.117	2.913	439.4	X
	B, a	72.8	15.1	-0.15	1389.9	4.132	2.911	429.6	X(Y)
	B, b	73.8	31.4	-0.12	1733.2	2.755	4.213	385.3	Y

표 3. Sellmeier 분산관계식 분산계수에 따른 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 구조

NO.	Side & Position	Type	미시 거칠기층		표면층		Sellmeier's Coefficient		
			Void (%)	Thickness (Å)	Void (%)	Thickness (Å)	A	B	λ_0 (Å)
Glass #1	A, a	X	72.0	14.9	-0.22	1239.9	3.983	2.850	431.9
		Y	69.1	13.9	-0.20	1313.9	2.560	4.203	375.7
Glass #2	B, a	X	72.8	14.3	-0.59	1028.1	4.010	2.853	452.2
		Y	66.0	12.6	-0.59	1067.7	2.606	4.210	397.5
Glass #3	B, a	X	72.8	15.1	-0.15	1389.9	4.132	2.911	429.6
		Y	83.3	22.8	-0.10	1474.6	2.749	4.230	385.8

대 0.007정도로 차이가 비교적 크게 나타났다. 표 3과 그림 3에서 그 예를 확인할 수 있다.

한편 최적맞춤을 실행을 할 때마다 분산계수의 값이 계속 변화하는 상기 4개 유형의 마지막 유형이 Glass #2의 "side A, position a"와 "side A, position b"에서 관찰되었으며, 이 유형에서도 굴절률이 전체 파장대역에 걸쳐 약 0.003 정도 차이가 관찰되었다. 그 결과를 표 4와 그림 4에 나타내었다.

4.2. 시료의 위치에 따른 굴절률 변화

그림 5는 표 2에 나타난 결과로부터 도출한 각각의 위치에 따른 Pr 첨가 셀레나이드 유리의 굴절률 분산그래프이다. 위치에 따른 굴절률의 차이는 대략 0.01~0.02 정도이고 Glass #2의 경우에는 0.027 정도로 여타 시료에 비해 비교적 큰 차이를 보여준다. 이는 그림 2와 표 2에서 알 수 있듯이 위치에 따른 측정값이 다른 시료들보다 크게 차이가 나고 시료 표면

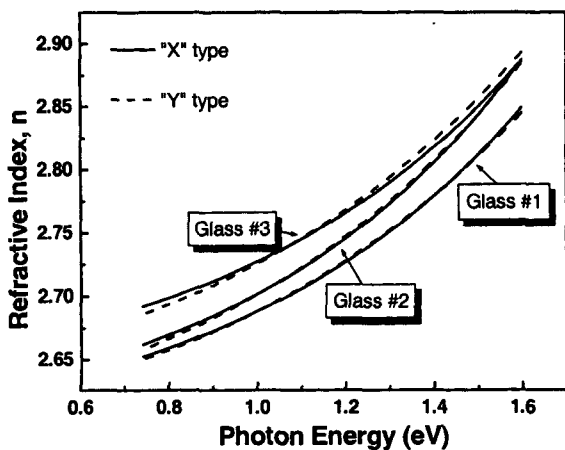


그림 3. Glass #1, Glass #2, Glass #3의 분산계수에 따른 굴절률.

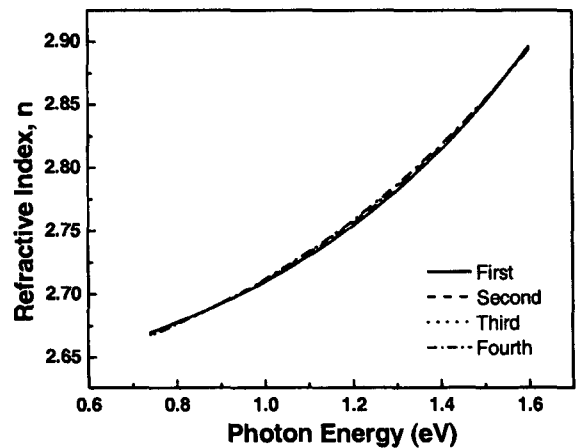


그림 4. Glass #2의 Sellmeier 분산계수에 따른 굴절률.

표 4. Sellmeier 분산관계식 분산계수에 따른 Pr 첨가 셀레나이드 유리 시료의 구조

NO.			미시 거칠기층		표면층		Sellmeier's Coefficient		
	Side & Position	Repeat	Void (%)	Thickness (Å)	Void (%)	Thickness (Å)	A	B	λ_0 (Å)
Glass #2	A, a	First	72.2	59.6	-0.24	1206.9	4.009	2.892	451.6
		Second	71.7	59.1	-0.21	1307.8	3.389	3.475	425.0
		Third	71.8	59.4	-0.19	1386.5	2.791	4.078	403.0
		Forth	71.5	59.3	-0.18	1474.2	1.916	4.937	376.1

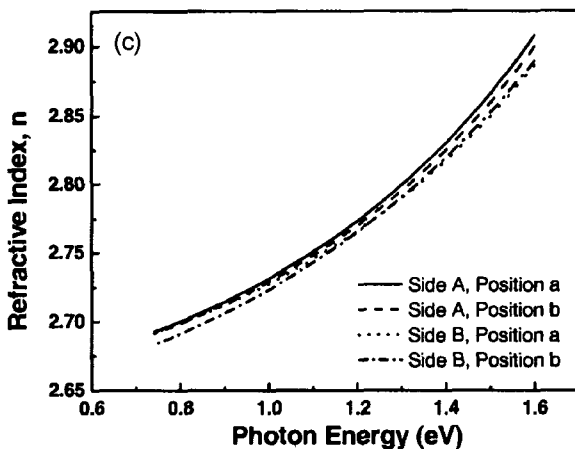
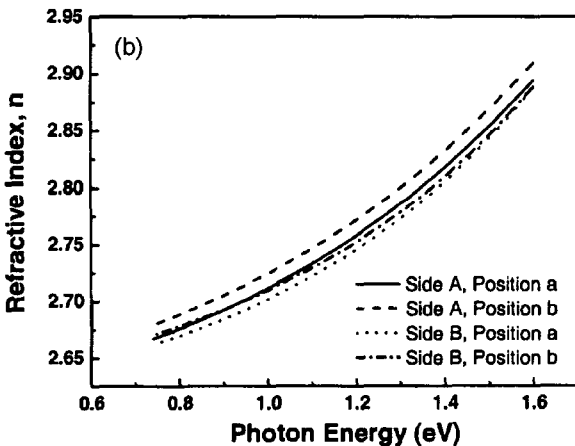
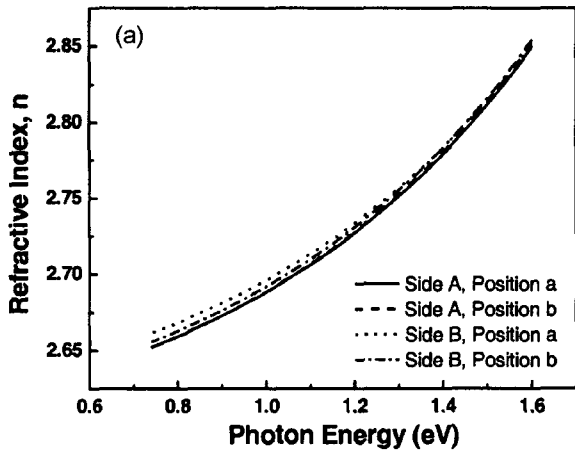


그림 5. Pr 첨가 셀레나이드 유리의 위치에 따른 굴절률. (a) Glass #1, (b) Glass #2, (c) Glass #3.

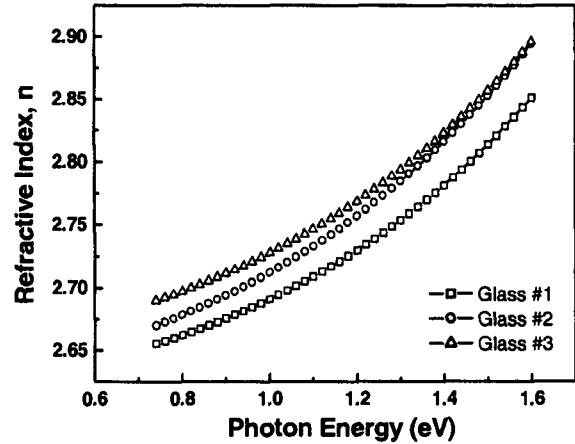


그림 6. Pr 첨가 셀레나이드 유리의 평균 굴절률.

에 따른 표면 거칠기의 정도가 크게 차이가 났기 때문이다. 그림 6은 각 시료의 위치에 따른 굴절률을 평균하여 나타낸 그래프이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 굴절률이 Ge 및 Sb 함량의 변화에 따라 Glass #1, Glass #2, Glass #3 순서로 증가한다. 즉, 굴절률은 Sb의 함량이 증가하고 Ge의 함량이 감소함에 따라 Glass #1 < Glass #2 < Glass #3의 경향을 보이며 각 시료의 위치에 따른 굴절률의 차이는 $\Delta n_{Glass1} \cong 0.01$, $\Delta n_{Glass2} \cong 0.027$, $\Delta n_{Glass3} \cong 0.02$ 이다.

V. 결 론

U 밴드 광섬유용 증폭기 소재인 Pr 첨가 셀레나이드 유리의 굴절률 분산을 광통신 파장대역을 중심으로 비교적 넓은 파장대역 범위에서 분광타원법을 사용하여 실험적으로 결정하였으며 이러한 측정 및 분석에 분광타원법이 유용하게 적용됨을 확인하였다. Pr 첨가 셀레나이드 유리의 굴절률은 Se의 함량을 고정하는 경우, Sb의 함량이 증가하고 Ge의 함량이 감소함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 분광타원법을 이용하여 덩어리 유리 물질의 굴절률을 0.003 정도의 오차로 결정할 수 있었으며, 시료 준비 과정의 개선을 통하여 위치에 따른 차이를 감소시키는 경우 굴절률 결정의 정밀도를 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] S. Tanabe, "Rare-earth-doped glasses for fiber amplifiers in broadband telecommunication," *Comptes Rendus Chimie*,

- vol. 5, no. 12, pp. 815-824, 2002.
- [2] T. Kasamatsu, Y. Yano and T. Ono, "Laser-diode-pumped highly efficient gain-shifted thulium-doped fiber amplifier operating in the 1480~1510 nm band," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 433-435, 2001.
- [3] Y. G. Choi, K. H. Kim, B. J. Park, J. Heo, "1.6 μm emission from Pr^{3+} : ($^3\text{F}_3$, $^3\text{F}_4$) \rightarrow $^3\text{H}_4$ transition in Pr^{3+} - and $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ -doped selenide glasses," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 9, pp. 1249-1251, 2001.
- [4] Y. G. Choi, B. J. Park, K. H. Kim, "1.6 μm emission from Ho^{3+} -doped fluoride glasses," *Opt. Lett.* vol. 28, no. 8, pp. 622-624, 2003.
- [5] Y. G. Choi, D. H. Cho, D. I. Chang, D. S. Lim, K. H. Kim, B. J. Park and J. Heo, "Pr³⁺-doped selenide fiber for 1610~1650 nm optical amplifiers," *ECOC 2000*, Post Deadline Paper 2-1.
- [6] Y. G. Choi, B. J. Park, K. H. Kim and J. Heo, "Pr³⁺- and Pr³⁺/Er³⁺-doped selenide glasses for potential 1.6 μm optical amplifier materials," *ETRI J.*, vol. 23, no. 2, pp. 97-105, 2001.
- [7] S. Y. Kim, Y. Kim, M.S. Kim, K.S. Eom, and S.K. Min, "Characterization of a MOCVD grown GaAs/AlGaAs superlattice structure using Spectroscopic Ellipsometry," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 24, no. 4, pp. 359, 1991.
- [8] S. Y. Kim, S. J. Kim, H. Seo, and M. R. Kim, "Complex Refractive Indices of Ge-Sb-Te Alloy Films: Variation with Nitrogen Addition and Wavelength Dependence," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 38, part 1, no. 3B, pp. 1713-1714, 1999.
- [9] S.Y. Kim, S. J. Kim, H. Lim, S. M. Lah, Y. D. Park, T. H. Jeong and H. Seo, "Spectro-ellipsometry Investigation of Cascaded Crystallization Behavior of Phase Change Ge-Sb-Te Alloy," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 40, part 1, no. 3B, pp. 1575, 2001.
- [10] Y. J. Cho, H. M. Cho, Y. W. Lee, H. Y. Lee, I. W. Lee, S. K. Lee, J. W. Sun, S. Y. Moon, H. K. Chung, H. Y. Pang, S. J. Kim and S. Y. Kim, "Optical Characterization of silicon dioxide layers grown on silicon under different growth conditions," *Thin Solid Films*, vol. 313-314, pp. 292-297, 1998.
- [11] K. Vedam, S.Y. Kim, L. D'Aries, and A.H. Guenther, "Non-destructive Depth Profiling of ZnS and MgO Films by Spectroscopic Ellipsometry," *Optics Letters*, vol. 12, no. 7, pp. 456, 1987.
- [12] J. Narayan, S. Y. Kim, K. Vedam, and R. Manukonda, "Formation and nondestructive characterization of ion implanted Silicon-on-Insulator layers," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, issue 5, pp. 343-345, 1985.
- [13] 김상열, 타원법(아주대학교 출판부, 수원, 2000).
- [14] 안일신, 엘립소메트리(한양대학교 출판부, 서울, 2000).
- [15] R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light* (North Holland Press, Netherlands, 1987), Chap. 3, 4.

Determination of optical properties of Pr³⁺-doped selenide glasses of Ge-Sb-Se system using spectroscopic ellipsometry

Sang Kyun Shin[†], Sang Jun Kim, and Sang Youl Kim

Department of Molecular Science and Technology, Ajou University, Suwon 442-749, KOREA

[†]E-mail: bynuncl@ajou.ac.kr

Yong Gyu Choi, Bong Je Park and Hong Seok Seo

Basic Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute

Yuseong P.O. Box 106, Daejeon 305-600, KOREA

(Received July 28, 2003, Revised manuscript November 18, 2003)

By using the spectroscopic ellipsometry, we have measured and analyzed the optical characteristics of Pr³⁺-doped selenide glasses of Ge-Sb-Se system, a strong candidate material for U band fiber amplifiers. The ellipsometric spectra measured in the transparent wavelengths range of the material were all fitted to a model consisting of ambient/roughness/thin film/substrate structures to obtain simultaneously the optical properties such as refractive index, in terms of Sellmeier parameters and film structure of Pr³⁺-doped selenide glasses. Repeated measurements on different positions in both polished faces rendered to verify positional dependence of measured spectro-ellipsometric data. Hence, the model made possible the analysis of the optical characteristics of the glasses. Even though surface roughness was mainly responsible for the position dependencies, the averaged refractive indexes were as precise as to reflect the minute compositional change tantamount to 1 mol%. The measured refractive indexes are useful for design of core and clad compositions of single-mode selenide optical fibers.

OCIS Codes : 060.2290, 060.2320, 060.2400, 120.2130, 120.5060.