

Dissertation Title	Study on Physical, Structural, Optical and Luminescence Properties of Zinc Bismuth Borate Glasses Doped with Eu^{3+}
Dissertation Credits	48
Candidate	Ms. Patarawagee Yasaka
Dissertation Advisors	Dr. Nakarin Pattanaboonmee Asst. Prof. Dr. Jakrapong Kaewkhao
Program	Doctor of Philosophy
Field of Study	Physics
Department	Physics
Faculty	Science
Academic Year	2014

Abstract

Zinc bismuth borate (ZBB) glasses of the composition $10\text{ZnO}:\text{xBi}_2\text{O}_3:(90-\text{x})\text{B}_2\text{O}_3$ (where $\text{x} = 15, 20, 25$ and 30 mol%) were prepared by the melt quenching technique. Their radiation shielding and optical properties were investigated and compared with theoretical calculations. The mass attenuation coefficients of ZBB glasses were measured at different energies which obtained by Compton scattering technique. The results showed the decrease of mass attenuation coefficient, effective atomic number and effective electron density values with increasing gamma ray energies. The experimental results are in good agreements with those of theoretical values. The glass samples with 25 and 30 mol% Bi_2O_3 concentration were observed with lower mean free path (MFP) values than the standard shielding concretes. These results indicated that the ZBB glasses could be developed as a lead-free radiation shielding material.

ZBB glasses doped with different Eu^{3+} concentrations of the composition $(60-\text{x})\text{B}_2\text{O}_3 : 30\text{Bi}_2\text{O}_3 : 10\text{ZnO} : \text{xEu}_2\text{O}_3$ with $0.0 \leq \text{x} \leq 1.0$ (in mol%) were synthesized by melt quenching technique at $1,100^\circ\text{C}$ for 3 h. In order to understand the role of Eu_2O_3 in zinc bismuth borate glass systems, physical, structural, optical and luminescence properties were investigated. The results showed that the density of the glasses increased whereas the molar volume decreased with increasing Eu_2O_3 concentrations. The hardness of glasses were also measured and found to increase with increasing Eu_2O_3 concentrations. The FTIR studies indicated that these glasses are made up of $[\text{BiO}_3]$, $[\text{BO}_3]$, $[\text{BO}_4]$ and $[\text{BO}]$ basic structural units. The optical absorption spectra of glasses were measured in the wavelength range of 1,800-2,400 nm. The intensity of all absorption bands increased with increasing Eu_2O_3 contents. In addition, the luminescence properties of Eu^{3+} doped $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ glass system were carried out using an excitation wavelength of 465 nm. Five luminescence bands were observed at 579 nm ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_0$), 589 nm ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_1$), 613 nm ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_2$), 651 nm ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_3$) and 696 nm ($^5\text{D}_0 \rightarrow ^7\text{F}_4$). The intense peak (red orange emission) of the glasses was found at 613 nm. The measured lifetime of $^5\text{D}_0$ excited state increased with increasing Eu_2O_3 concentrations due to the increase of asymmetry around Eu_2O_3 . In conclusion, all the glass samples obtained in this study have a potential for applications in laser and optical devices.

Keywords : Effective Atomic Number / Electron Density / Eu_2O_3 / Luminescence / Mass Attenuation Coefficient / Zinc Bismuth Borate Glass

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางโครงสร้าง ทางแสง และทางลูมิเนสเซนซ์ของแก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรตที่เจือด้วยไอออนของ Eu^{3+}
หน่วยกิต	48
ผู้เขียน	นางสาวภัทรวจี ยะสะกะ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.นครินทร์ พัฒนบุญมี ผศ. ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว
หลักสูตร	ปรัชญาคุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
สายวิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

ระบบแก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรตถูกเตรียมขึ้นจาก $10\text{ZnO}:\text{xBi}_2\text{O}_3:(90-\text{x})\text{B}_2\text{O}_3$ เมื่อ x มีค่าเท่ากับ 15, 20, 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โมล) ด้วยเทคนิคการหลอมเหลวและปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว จากนั้นได้ศึกษาสมบัติการป้องกันรังสีแกมมาและสมบัติทางแสง โดยการเปรียบเทียบค่าทฤษฎีและค่าการทดลอง นอกจากนี้ได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรตโดยวัดที่ระดับพลังงานที่แตกต่างกันด้วยเทคนิคการวัดแบบการกระเจิงคอม ผลที่ได้พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ค่าเลขอะตอมยังผล และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนยังผล มีค่าลดลง เมื่อเพิ่มระดับพลังงานของรังสีแกมมามากขึ้น พบว่าค่าที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี แก้วตัวอย่างที่เติมปริมาณของ Bi_2O_3 ที่ความเข้มข้น 25 และ 30 เปอร์เซ็นต์โมล ค่าระยะทางอิสระเฉลี่ย (MFP) มีค่าสูงกว่าค่ามาตรฐานทางการกำบังรังสี จากงานวิจัยนี้ แก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรตสามารถนำไปพัฒนาใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีที่ปราศจากตะกั่วได้

แก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรตที่เจือด้วยไอออนของยูโรเปียม ถูกเตรียมขึ้นจากองค์ประกอบ $(60-\text{x})\text{B}_2\text{O}_3 : 30\text{Bi}_2\text{O}_3 : 10\text{ZnO} : \text{xEu}_2\text{O}_3$ เมื่อ $0.0 \leq \text{x} \leq 1.0$ (เปอร์เซ็นต์โมล) ด้วยเทคนิคการหลอมที่อุณหภูมิ 1,100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางโครงสร้าง ทางแสงและทางลูมิเนสเซนซ์ของระบบแก้วซิงค์บิสมัทบอร์เรต เพื่อให้เข้าใจบทบาทของยูโรเปียมออกไซด์ ผลที่ได้พบว่า ความหนาแน่นของแก้วที่ได้มีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาตรเชิงโมลาร์มีค่าลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของยูโรเปียมออกไซด์ ค่าความแข็งของแก้วมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของยูโรเปียมออกไซด์ ผลการศึกษาผลของฟลูออไรด์ทราน

ฟอร์ม ซึ่ให้เห็นว่าระบบแก้วนี้เกิดจากการสั้นของโมเลกุลในโครงสร้าง $[\text{BiO}_3]$, $[\text{BO}_3]$, $[\text{BO}_4]$ และ $[\text{BO}]$ เมื่อวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 1,800-2,400 นาโนเมตร พบว่า ค่าความเข้มของพีการดูดกลืนแสงสูงขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของยูโรเปียมออกไซด์ นอกจากนี้ได้ตรวจสอบสมบัติการเปล่งแสงของ Eu^{3+} ที่เจือในระบบแก้วซึ่งค้บิสมัทบอร์เรต จากการกระตุ้นด้วยความยาวคลื่น 465 นาโนเมตร พบพีการเปล่งแสง 5 พีคที่ความยาวคลื่น 579 นาโนเมตร (${}^1\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_0$), 589 นาโนเมตร (${}^1\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_1$), 613 นาโนเมตร (${}^1\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_2$), 651 นาโนเมตร (${}^1\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_3$) และ 696 นาโนเมตร (${}^1\text{D}_0 \rightarrow {}^7\text{F}_4$) โดยพีคที่มีค่าความเข้มสูงที่สุด คือช่วงการเปล่งแสงสีแดงส้ม พบที่ความยาวคลื่น 613 นาโนเมตร จากการวัดค่าเวลาที่มีการเปล่งแสงที่สถานะ ${}^1\text{D}_0$ พบว่า สมบัติในเชิงไม่สมมาตรมีค่าสูงขึ้นตามปริมาณความเข้มข้นของยูโรเปียมออกไซด์ ในงานวิจัยนี้ ระบบแก้วที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเลเซอร์และด้านทัศนอุปกรณ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : แก้วซึ่งค้บิสมัทบอร์เรต / ความหนาแน่นอิเล็กตรอนยังผล / ยูโรเปียมออกไซด์ / เลขอะตอมยังผล / ลูมิเนสเซนซ์ / สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to express my sincere thanks to my thesis advisor and co–advisor, Lec. Dr. Nakarin Pattanaboonmee and Asst. Prof. Dr. Jakrapong Kaewkhao for invaluable help and constant encouragement throughout the course of the research. I am most grateful for their teaching and advice, not only the research methodologies but also many other methodologies in life. I would not have achieved this far and this thesis would not been completed without all the support that I have always received from them.

In addition, I am grateful for the staff at the Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University and the Radiation Science Research Institute, Kyungpook National University, Korea, for all their assistance, including research data and facilities, in the writing of this paper, thank to Committee for the committee reviewing this dissertation. Also, much thank Prof. Dr. Hong Joo Kim, Department of Physics, Kyungpook National University, for x - ray luminescence measurement.

I extend my sincere thanks to the Assoc. Prof. Dr. Supanee Limsuwan, Asst. Prof. Dr. Wandee Onreabroy, Dr. Panuwat Chimalawong and the rest of committee for examination and completion of my thesis.

I would like to thank Nakhon Pathom Rajabhat University for Ph.D. grant.

I also would like to give my sincere thanks to the Center of Excellence in Glass Technology and Materials Science (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University for the equipments and facilities. I offer a special thanks to all of my colleagues who have helped, sometimes unwittingly, including: Dr. Keerati Kirdsiri, Dr. Nattapon Srisittipokakul, Dr. Pruittipol Limkitjaroenporn, Dr. Yotsakit Ruangthawee, Dr. Rungsan Ruamnikhom and Dr. Kitipun Boonin, for supporting and assisting my research and experiments.

Finally, it is with the greatest gratitude and humility that I thank my family. I could not have contemplated the genesis and completion the Ph.D. program without their understanding, encouragement, patience and support. I would like to express my gratefulness to my parents and my younger sister who has given me the encouragement, ambition and inspiration.

CONTENTS

	PAGE
ENGLISH ABSTRACT	i
THAI ABSTRACT	ii
ACKNOWLEDGEMENTS	iv
CONTENTS	v
LIST OF TABLES	viii
LIST OF FIGURES	ix
LIST OF ABBREVIATIONS AND SYMBOLS	xiii
CHAPTER	
1. INTRODUCTION	1
1.1 Background	1
1.2 Motivation	2
1.3 Objectives	3
1.4 Thesis Significance	3
1.5 Literature Reviews	3
2. OVERVIEWS AND THEORY	11
2.1 Glass Formation	11
2.1.1 Zachariasen's Rule for Structure of Glass	11
2.1.2 Structural Concepts of Glass Formation	12
2.2 Structural of B ₂ O ₃ and Borate Glasses	14
2.3 Molar Volume	19
2.4 Interaction of Gamma and X-rays with Matter	20
2.4.1 Compton Scattering or Compton Effect	20
2.4.2 Photoelectric Effect	23
2.4.3 Pair Production	25
2.5 Gamma - Ray Attenuation Coefficient	27
2.5.1 Measuring Attenuation Coefficient	29
2.5.2 Mixture and Compounds	30
2.6 Effective Atomic Number and Effective Electron Density	30
2.7 Optical Properties	32
2.8 Absorption Processes in Solids	34
2.9 Electronic Configuration of Lanthanide Atoms in the Ground State	36
2.10 Lanthanide Contraction	38
2.11 Specificity of the Photo Physical Properties of Rare Earth Compounds	41
2.11.1 Spectral Terms	42
2.11.2 Selection Rules for Atomic Spectra	44
2.12 Luminescence	45
2.12.1 Fluorescence	46
2.12.2 Phosphorescence	46
2.13 Luminescence Process	46
2.14 Luminescence of Specific Rare Earth Ions	58
2.15 Lifetime	59
2.16 Absorption Spectra	59

CONTENTS (CONT' D)

CHAPTER	PAGE
2.17	61
2.18	62
2.19	63
3. MATERIALS AND METHODS	66
3.1	66
3.1.1	66
3.1.2	71
3.1.3	72
3.1.4	74
3.1.5	75
3.1.6	76
3.1.7	77
3.1.8	77
3.1.9	78
3.1.10	78
3.2	79
3.2.1	80
3.2.2	81
3.2.3	81
4. RESULTS AND DISCUSSION	83
4.1	83
4.1.1	83
4.1.2	84
4.1.3	86
4.1.4	91
4.1.5	92
4.1.6	94
4.1.7	95
4.1.8	96
4.1.9	97
4.2	98
4.2.1	98
4.2.2	99
4.2.3	101
4.2.4	102
4.2.5	104
4.2.6	105
4.2.7	108
4.2.8	109
4.2.9	110

CONTENTS (CONT' D)

CHAPTER		PAGE
5. CONCLUSION		112
5.1	Zinc Bismuth Borate Glass System	112
5.1.1	General Characteristic of Glass Samples	112
5.1.2	Density, Molar Volume and Hardness	112
5.1.3	Gamma - Rays Shielding Properties	112
5.1.4	UV - VIS Absorption Study	113
5.1.5	Luminescence Properties	113
5.2	Eu ³⁺ Ion Doped in Zinc Bismuth Borate Glasses	113
5.2.1	General Characteristic of Glass Samples	113
5.2.2	Density, Molar Volume and Hardness	113
5.2.3	UV - VIS -NIR Absorption Study	114
5.2.4	Luminescence Properties	114
REFERENCES		115
CURRICULUM VITAE		125

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
1.1	Summary and literature reviews	9
2.1	Coordination number for glass formers, modifiers and intermediates	11
2.2	Radius ratios for typical network-formers	12
2.3	The electronic configurations of lanthanide elements	37
2.4	Electronic configurations and spectral terms of trivalent lanthanide ions in the ground state	41
3.1	Chemical compositions of the prepared glasses	66
3.2	Fractional doping of Eu_2O_3 for zinc bismuth borate glass	81
4.1	Chemical compositions of the prepared glasses	83
4.2	The values of density, molar volume and molecular weight of ZBB glass samples	84
4.3	The mass attenuation coefficients of ZBB glasses of different Bi_2O_3 concentrations at different gamma ray energies	86
4.4	FTIR analysis of the $x\text{Bi}_2\text{O}_3 : 10\text{ZnO} : (90 - x) \text{B}_2\text{O}_3$ (ZBB) glass system	93
4.5	Fractional doping of Eu_2O_3 for zinc bismuth borate glass	98
4.6	The values of density, molar volume and molecular weight of ZBB glasses with different Eu_2O_3 concentration	99
4.7	FTIR analysis of the $(60 - x)\text{B}_2\text{O}_3 : 30\text{Bi}_2\text{O}_3 : 10\text{ZnO} : x\text{Eu}_2\text{O}_3$ glass system	103

LIST OF FIGURES

FIGURE		PAGE
2.1	A two - dimensional representation of A_2O_3 : (a) crystal and (b) glass	13
2.2	A two - dimensional representation of a sodium silicate glass	13
2.3	The superposition of orbitals in B_2O_3	15
2.4	Different structural units present in alkali borate glasses	15
2.5	Creation of NBO when introduction of modifier to borate glass	16
2.6	Structure change from B_3 to B_4 introduction of modifier to borate glass	16
2.7	Variation of B_4 with R_2O concentration	17
2.8	Variation in the number of bridging oxygen atoms (O_b), the coefficient of thermal expansion (α_T) and the softening temperature (S_p) as a function of alkali - oxide concentration in a B_2O_3 -containing binary glass	18
2.9	The compton effect	22
2.10	Dependence of the compton cross section on (a) photon energy (b) atomic number of the materials	23
2.11	The photoelectric effect	24
2.12	Dependence of the photoelectric cross - section on (a) photon energy and (b) atomic number of the material	25
2.13	Pair production. The gamma disappears and a positron-electron pair is created. Two 0.511 MeV photons are produced when the positron annihilates	26
2.14	Dependence of the pair - production cross section on (a) photon energy and (b) atomic number of the material	27
2.15	The relative importance of the three major gamma interactions	28
2.16	Mass attenuation coefficients for lead	29
2.17	The intensity of the transmitted beam decreases exponentially with material thickness	30
2.18	Characteristic types of optical transitions shown both for the flat - band model and for the E vs k plot	36
2.19	The relative energy level of the different electronic configurations, $4f^n 6s^2$ or $4f^{n-1} 5d^1 6s^2$ of neutral lanthanide atoms	37
2.20	Radial distribution functions of $4f$, $5s$, $5p$, $5d$, $6s$ and $6p$ electrons for cerium	38
2.21	Radial distribution functions of $4f$, $5s$, $5p$ electrons for Pr^{3+}	38
2.22	The relationship between ionic radius and atomic number of lanthanide ions	40
2.23	The relationship between atomic radius and atomic number of lanthanide atoms	40
2.24	The energy level diagram for trivalent lanthanide ions	43
2.25	Various radiative and non - radiative process	45
2.26	Luminescent ion A in its host lattice	47

LIST OF FIGURES (CONT' D)

FIGURE	PAGE	
2.27	Schematic energy level scheme of the luminescent ion A	47
2.28	Luminescent material showing energy transfer from sensitizer S to an activator A	48
2.29	Symmetrical stretching vibration of a square-planar complex	49
2.30	Configuration co-ordinate diagram	50
2.31	The optical absorption transition between two parabolas which have an offset relative to each other in the configurational co - ordinate diagram consists of a broad adsorption band	51
2.32	The optical absorption transition between two parabolas which have an offset relative to each other in the configurational co - ordinate diagram consists of a broad adsorption band continue	52
2.33	Configuration co - ordinate diagram	53
2.34	Emission and excitation spectra of the Bi ³⁺ luminescence of LaOCl: Bi ³	54
2.35	Configurational co - ordinate diagrams showing non - radiative transitions	56
2.36	Energy transfer from a sensitizer to an activator	57
2.37	Similarity in color between ions with the electron configurations $4f^n$ and $4f^{14-n}$	60
2.38	Basic components of an FTIR system	64
2.39	FTIR instrumentation process	65
3.1	Diagram shows the steps of the preparation process of glass samples	67
3.2	High alumina crucible	67
3.3	High temperature electrical furnaces for glass melting	68
3.4	Melting at 1,100 °C	68
3.5	Stainless steel moulds	69
3.6	Casting melt glass in stainless steel mould	69
3.7	Glasses in stainless steel mould	70
3.8	High temperature electrical furnace for annealing glass	70
3.9	Glass before cut and polish	71
3.10	The front page of Win X Com program	72
3.11	The process of characterization	73
3.12	Schematic of the compton scattering technique for mass attenuation coefficient measurement	74
3.13	The sensitive microbalance for density determination	74
3.14	X - ray diffractometer	76
3.15	Agilent Cary - 630 FTIR spectrometer	77
3.16	UV- visible spectrophotometer (Varian, Cary50)	77
3.17	UV - VIS - NIR spectrophotometer (UV - 3600, Shimadzu)	78
3.18	Fluorescence spectrophotometer (Cary Eclipse, Agilent)	78
3.19	Experimental setup of X - rays luminescence measurement	82
3.20	Diagram of X - rays luminescence measurement	82

LIST OF FIGURES (CONT' D)

FIGURE		PAGE
4.1	Photographs of the as - prepared zinc bismuth borate glass samples	84
4.2	Densities of ZBB glasses doped with different Bi ₂ O ₃ concentrations	85
4.3	Vicker's hardness of ZBB glasses doped with different Bi ₂ O ₃ concentrations	85
4.4	Experimental and theoretical values of the total mass attenuation coefficients of ZBB glasses at different energies	87
4.5	Experimental and theoretical values of the total mass attenuation coefficients of ZBB glasses of different Bi ₂ O ₃ concentrations	87
4.6	Experimental and theoretical values of the effective atomic numbers of ZBB glasses at different energies	88
4.7	Experimental and theoretical values of the effective electron densities of ZBB glasses at different energies	89
4.8	The photon mean free path of ZBB glasses at different energies compared with WinXCom results on some standard shielding materials	89
4.9	Diffraction patterns of ZBB glasses doped with different Bi ₂ O ₃ concentrations	91
4.10	The IR transmission spectra of the xBi ₂ O ₃ - 10ZnO - (90 - x) B ₂ O ₃ (ZBB) glass system	93
4.11	Optical absorption spectra of the ZBB glasses doped with different Bi ₂ O ₃ concentrations	94
4.12	Luminescence spectra of the ZBB glasses doped with different Bi ₂ O ₃ concentrations when excited with 302 nm at room temperature	95
4.13	The Schematic energy levels diagram and possible transition pathways of Bi ³⁺ ion	96
4.14	The lifetime profiles of ³ P ₁ level of Bi ³⁺ : ZBB glasses	96
4.15	The color measurement of ZBB glasses in CIE *a*b* color scale	97
4.16	Photographs of ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentration	98
4.17	Densities of ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentration	100
4.18	Vicker's hardness of ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentrations	100
4.19	Diffraction patterns of ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentrations	101
4.20	The IR transmission spectra of ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentrations	103
4.21	Optical absorption spectra of the ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentrations	105
4.22	Luminescence spectra of the ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentrations when excited with 465 nm at room temperature	106
4.23	The schematic partial energy levels diagram and possible transition pathways of Eu ³⁺ ion	107
4.24	The lifetime profiles of ⁵ D ₀ level of Eu ³⁺ : ZBB glasses	108
4.25	The CIE diagram of ZBB glasses doped with different Eu ₂ O ₃ concentration	109

LIST OF FIGURES (CONT' D)

FIGURE		PAGE
4.26	The X - ray luminescence spectra $(60 - x)\text{B}_2\text{O}_3 : 30\text{Bi}_2\text{O}_3 : 10\text{ZnO} : x\text{Eu}_2\text{O}_3$ glasses	110
4.27	X - ray luminescence process of Eu^{3+} $(60 - x)\text{B}_2\text{O}_3 : 30\text{Bi}_2\text{O}_3 : 10\text{ZnO} : x\text{Eu}_2\text{O}_3$ glasses	111

LIST OF ABBREVIATIONS AND SYMBOLS

A	Absorbance
B	Constant or Band Tailing Parameter
BO	Bridging Oxygen Atom
c	Velocity of Light
ED	Electric Dipole
E_F	Fermi Energy
E_g	Energy Gap
E_{gopt}	Optical Band Gap
E_g^{dir}	Direct Optical Band Gap
E_g^{ind}	Indirect Optical Band Gap
E	Width of Tail
Eu	Urbach's Energy
EO	Mobility Gap
eV	Electronvolt
F	Field Strength
h	Planck's Constant
I_0	Intensities of Incident Radiation
I	Intensities of Transmitted Radiation
IR	Infrared
K	Kelvin
k_B	Boltzmann's Constant
n	Refractive Index
m	Mass
M_T	Molecular Weight
n	Refractive Index
N_A	Avogadro Constant
NBOs	Non-Bridging Oxygens
NIR	Near Infrared
P	Pressure
R	Universal Gas Constant
R.D.	Relative density
RE	Rare-earth
S.G.	Specific Gravity
T	Temperature
T_b	Boiling Temperature
T_g	Glass Transition Temperature
T_m	Melting Temperature
UV	Ultraviolet
VIS	Visible
V	Volume
V_m	Molar Volume
V_p	Phase Velocity
w_i	Weight Fraction
w_a	Weight of the Specimen in Air
w_b	Weight of the Specimen in Water

LIST OF ABBREVIATIONS AND SYMBOLS (CONT' D)

x	Thickness of Sample
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy
XRD	X-ray Diffraction
	Absorption Coefficient
T	Thermal Expansion Coefficient
r	Material's Relative Permittivity
	Density
μ_r	Relative permeability
ν_d	Abbe Number
	Wavelength