



**UNIVERSITI PUTRA MALAYSIA**

**PENCIRIAN SIFAT OPTIK, MEKANIK DAN ELEKTRIK KACA  
BISMUTH LITHIUM BORAT DAN FOSFAT**

**LIU WEI WEN.**

**FS 2005 37**



**PENCIRIAN SIFAT OPTIK, MEKANIK DAN ELEKTRIK KACA BISMUTH  
LITHIUM BORAT DAN FOSFAT**

**Oleh**

**LIU WEI WEN**

**Tesis ini Dikemukakan Kepada Sekolah Pengajian Siswazah, Universiti Putra  
Malaysia, Sebagai Memenuhi Keperluan Untuk Ijazah Master Sains**

**Mei 2005**



*Dedikasi ini ditujukan khas kepada:*

*Ahli keluarga yang disayangi,*

*Rakan seperjuangan yang dikasihi,*

*Rakan-rakan yang dihormati,*

*Dan*

*Orang yang dicintai.*

Abstrak tesis yang dikemukakan kepada Senat Universiti Putra Malaysia sebagai memenuhi keperluan untuk ijazah Master Sains

**PENCIRIAN SIFAT OPTIK, MEKANIK DAN ELEKTRIK KACA BISMUTH LITHIUM BORAT DAN FOSFAT**

Oleh

**LIU WEI WEN**

**Mei 2005**

**Pengerusi : Prof. Madya Sidek Hj. Abd. Aziz, PhD**

**Fakulti : Sains**

Dalam kajian ini, kaca  $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$  adalah terdiri daripada siri A1 ( $x = 0.005$   $y = 0.045$   $z = 0.95$ ), siri A2 ( $x = 0.01$   $y = 0.09$   $z = 0.90$ ), siri A3 ( $x = 0.015$   $y = 0.135$   $z = 0.85$ ), siri A4 ( $x = 0.02$   $y = 0.18$   $z = 0.80$ ), siri B1 ( $x = 0.0075$   $y = 0.0425$   $z = 0.95$ ), siri B2 ( $x = 0.015$   $y = 0.085$   $z = 0.90$ ), siri B3 ( $x = 0.0225$   $y = 0.1275$   $z = 0.85$ ) dan siri B4 ( $x = 0.03$   $y = 0.17$   $z = 0.80$ ) telah disediakan dengan menggunakan teknik penyejukan mendadak. Bagi sampel kaca  $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ , komposisi kaca terdiri daripada C1 ( $x = 0.005$   $y = 0.045$   $z = 0.95$ ), siri C2 ( $x = 0.01$   $y = 0.09$   $z = 0.90$ ), siri C3 ( $x = 0.015$   $y = 0.135$   $z = 0.85$ ), siri C4 ( $x = 0.02$   $y = 0.18$   $z = 0.80$ ), siri D1 ( $x = 0.0075$   $y = 0.0425$   $z = 0.95$ ), siri D2 ( $x = 0.015$   $y = 0.085$   $z = 0.90$ ), siri D3 ( $x = 0.0225$   $y = 0.1275$   $z = 0.85$ ) dan siri D4 ( $x = 0.03$   $y = 0.17$   $z = 0.80$ ).

Ketumpatan kaca diukur dengan menggunakan prinsip Archimedes. Kaca bismuth litium borat menunjukkan ketumpatan yang semakin bertambah tetapi ketumpatan bagi kaca bismuth litium fosfat hanya naik pada awalnya dan kemudian menurun. Ujian tanpa



musnah ultrasonik digunakan untuk menguji sifat kekenyalan kaca. Peralatan utama yang digunakan ialah sistem MBS 8000 yang menggunakan kaedah dedenyut gema kerana ia dapat menentukan nilai-nilai halaju gelombang membujur dan melintang yang melalui sampel kaca. Halaju ultrasonik bagi kaca bismuth litium borat menunjukkan corak peningkatan yang menyerupai anomali jika kita membandingkannya dengan corak pertambahan yang ditunjukkan oleh kaca bismuth litium fosfat. Corak tersebut menandakan penguatan rangkaian pada mulanya dan perlemahan kekuatan ikatan keseluruhan yang beransur-ansur selepas suatu amaun tertentu pengubah suai rangkaian  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  dan  $\text{LiCl}$  ditambahkan.

Kekonduksian ionik kaca diukur dengan menggunakan teknik pengukuran impedans kompleks dalam julat frekuensi 20 Hz – 1 MHz. Sampel kaca dengan ketebalan 2mm diapitkan di antara dua kepingan elektrod secara selari oleh klip spring. Konduktan,  $G$  telah diukur untuk mengira kekonduksian ionik. Kekonduksian kaca bismuth litium borat semakin bertambah dengan peningkatan kepekatan  $\text{LiCl}$ . Manakala kaca bismuth litium fosfat menunjukkan kekonduksian yang bersifat anomali dalam penggantungan komposisi oleh tenaga keaktifan. Struktur kaca memainkan peranan yang penting dalam menentukan kekonduksian kaca. Pertambahan  $\text{LiCl}$  akan menyebabkan pembentukan struktur rangkaian kaca yang lebih terbuka dan menghasilkan jalan pergerakan yang lebih mudah untuk ion bergerak seperti  $\text{Li}^+$ .

Labsys DTA digunakan untuk menentukan suhu transisi kaca.  $T_g$  bagi kaca bismuth litium borat meningkat pada awalnya dan kemudiannya menurun dengan penambahan



pengubah suai oksida. Perubahan daripada unit  $BO_3^-$  kepada unit  $BO_4^-$  dalam struktur kaca telah menyebabkan kenaikan  $T_g$  tetapi penghasilan oktahedral  $BiO_6$  menyebabkan pengurangan nilai  $T_g$ . Peningkatan nilai  $T_g$  bagi kaca bismuth litium fosfat telah diperhatikan semasa saiz cecincin bertambah daripada 2- kepada 4-ahli cecincin.

Tenaga jurang optik bagi kaca  $Bi_2O_3$ -LiCl- $B_2O_3$  menunjukkan pertambahan. Ini disebabkan oleh perubahan struktur kaca daripada  $BO_3^-$  kepada  $BO_4^-$ . Apabila terhasilnya  $BiO_6$ , tenaga jurang optik akan menurun dan ini berlaku pada kepekatan  $Bi_2O_3$  yang lebih tinggi. Tenaga jurang optik bagi kaca fosfat adalah tertinggi pada kepekatan gelung yang terkecil atau  $P_2O_5$  tertinggi dan semakin menurun apabila gelung terkecil digantikan dengan gelung yang lebih besar.

Abstract of thesis presented to the Senate of Universiti Putra Malaysia in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science

**CHARACTERIZATION OF OPTICS, MECHANICS AND ELECTRICAL PROPERTIES OF BISMTUH LITHIUM BORATE AND PHOSPHATE GLASSES**

By

**LIU WEI WEN**

May 2005

**Chairman : Associate Professor Sidek Hj. Abd. Aziz, PhD**

**Faculty : Science**

In this work,  $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$  glasses that consists a systematic series beginning with A1 ( $x = 0.005$   $y = 0.045$   $z = 0.95$ ), A2 ( $x = 0.01$   $y = 0.09$   $z = 0.90$ ), A3 ( $x = 0.015$   $y = 0.135$   $z = 0.85$ ), A4 ( $x = 0.02$   $y = 0.18$   $z = 0.80$ ), B1 ( $x = 0.0075$   $y = 0.0425$   $z = 0.95$ ), B2 ( $x = 0.015$   $y = 0.085$   $z = 0.90$ ), B3 ( $x = 0.0225$   $y = 0.1275$   $z = 0.85$ ) and B4 ( $x = 0.03$   $y = 0.17$   $z = 0.80$ ). Two series of  $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$  were prepared which is C1 ( $x = 0.005$   $y = 0.045$   $z = 0.95$ ), C2 ( $x = 0.01$   $y = 0.09$   $z = 0.90$ ), C3 ( $x = 0.015$   $y = 0.135$   $z = 0.85$ ), C4 ( $x = 0.02$   $y = 0.18$   $z = 0.80$ ), D1 ( $x = 0.0075$   $y = 0.0425$   $z = 0.95$ ), D2 ( $x = 0.015$   $y = 0.085$   $z = 0.90$ ), D3 ( $x = 0.0225$   $y = 0.1275$   $z = 0.85$ ) and D4 ( $x = 0.03$   $y = 0.17$   $z = 0.80$ ). The preparations of glasses were done by using the rapid quenching technique.

The densities of each sample were determined by using the Archimedes' principle. Bismuth lithium borate glasses show increasing trend in densities however, bismuth lithium phosphate glasses exhibit the nonlinear behavior. Non-Destructive Testing was



used to examine the elastic properties of glasses. The MBS 8000 system, a product of Matec Instruments Inc. which applies echo pulse technique was used to determine the longitudinal and shear wave velocities of each glass sample. The ultrasound velocities of bismuth lithium borate glasses exhibit an anomalous trend when compared with the increasing trend shown by ultrasound velocities of bismuth lithium phosphate glasses. The trend implies the initial strengthening of the network and gradually weakening of the overall bonding strength after a certain amount of modifier network,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  and  $\text{LiCl}$  is added.

The ionic conductivities of these glasses were determined by using complex impedance measurement technique in the frequency range 20 Hz – 1 MHz. Samples with 2 mm thickness were sandwiched between two parallel electrodes by a spring clip. The conductance  $G$  was obtained to calculate the ionic conductivity. The activation energy of bismuth lithium borate glasses decrease with the increasing mole fraction of  $\text{LiCl}$ . However, bismuth lithium phosphate glasses give an anomalous trend in the composition dependence of activation energy. Glasses structure plays an important role in determining the ionic conductivity of glasses. An addition of  $\text{LiCl}$  into glasses will contribute to formation of more open structures and make an easy path for mobile ions like  $\text{Li}^+$  to move.

Labsys DTA machine was used to determine the glass transition temperatures,  $T_g$ . The  $T_g$  of bismuth lithium borate glasses increase initially and then decrease with addition of modifier oxide. Transformation of units  $\text{BO}_3^-$  to units  $\text{BO}_4^-$  in the glass structure





contributes to an increase in  $T_g$  but the formation of  $\text{BiO}_6$  octahedral causes a decrease in  $T_g$ . An increase in  $T_g$  of bismuth lithium phosphate glasses was observed as the ring size increases from two- to four-membered rings.

The optical band gap of  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-B}_2\text{O}_3$  increases with increasing  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  and LiCl content in the glass due to the transformation of units  $\text{BO}_3^-$  to units  $\text{BO}_4^-$ . The presence of  $\text{BiO}_6$  causes a decrease in  $E_{opt}$  of bismuth lithium borate glasses in the regions with high  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  content. The highest values of the optical band gap of bismuth lithium phosphate glasses gap correspond to higher content of smallest ring size and then it gradually decrease upon substitution of smallest ring by larger rings.

## PENGHARGAAN

Saya ingin menggunakan peluang ini untuk mengucapkan ribuan terima kasih kepada Prof. Madya Dr. Sidek Hj. Abd. Aziz, selaku penasihat projek saya. Sifatnya yang peramah, sabar dan tidak jemu memberi pendapat dan tunjuk ajar yang sangat berharga agar saya dapat menyiapkan projek ini. Di samping itu, saya juga berterima kasih kepada penasihat bersama saya iaitu Prof. Madya Dr. Zainal Abidin Talib, Prof. Madya Dr. Zaidan Abdul Wahab dan Prof. Madya Dr. Azmi Zakaria untuk nasihat dan komen berharga yang dicurahkan.

Tidak lupa juga ucapan terima kasih ditujukan kepada Prof. Madya Dr. Elias Saion, Prof. Dr. Abdul Halim Shaari dan Prof. Madya Dr. Mansor bin Hashim yang sudi membenarkan penggunaan peralatan di dalam makmal mereka. Pertolongan dan kerjasama yang diberikan oleh semua staf Jabatan Fizik sepanjang kajian saya juga amat dihargai.

Akhirnya, saya hendak merakamkan terima kasih kepada semua ahli keluarga dan kawan-kawan saya iaitu Loh Yen Nee, Hamezan, Bux, Khe Cheng Seong, Lee Kim Yee, Wong Peng Kiong, Yap Siew Hung, Lim Kean Pah, Kuan Ya Chin dan Lim Chee Siong yang banyak membantu menjayakan projek penyelidikan ini.



## JADUAL KANDUNGAN

### MUKA SURAT

<b>DEDIKASI</b>	ii
<b>ABSTRACT</b>	iii
<b>ABSTRAK</b>	vi
<b>PENGHARGAAN</b>	ix
<b>PENGESAHAN</b>	x
<b>PERAKUAN</b>	xii
<b>SENARAI JADUAL</b>	xvi
<b>SENARAI RAJAH</b>	xvii
<b>SENARAI SINGKATAN</b>	xxv

### BAB

<b>1</b>	<b>Pengenalan</b>	1.1
	1.1 Definisi kaca	1.1
	1.2 Perbezaan antara kaca dengan hablur	1.1
	1.3 Ultrasonik	1.2
	1.4 Kaca pengkonduksikan elektrik	1.3
	1.5 Kepentingan sifat optik kaca	1.4
	1.6 Suhu transisi, $T_g$ kaca	1.6
	1.6 Hipotesis	1.7
	1.7 Objektif kajian	1.7
	1.8 Organisasi bab	1.8
<b>2</b>	<b>Latar Belakang Kajian</b>	2.1
	2.1 Pengenalan	2.1
	2.2 Kajian ultrasonik	2.2
	2.3 Kajian suhu transisi	2.5
	2.4 Kajian kekonduksian elektrik	2.8
	2.5 Kajian optik	2.15
	2.6 Kaca borat	2.19
	2.7 Kaca fosfat	2.29
	2.8 Ringkasan	2.36
<b>3</b>	<b>Teori</b>	3.1
	3.1 Teori kekenyalan kaca	3.1
	3.1.1 Rambat gelombang dalam bahan	3.1
	3.1.2 Tegasan	3.2
	3.1.3 Terikan	3.5
	3.1.4 Anjakan dan Terikan	3.8
	3.1.5 Persamaan Gerakan	3.8
	3.1.6 Hubungan antara hukum Hooke dengan pemalar kenyal bahan	3.11
	3.1.7 Perkaitan antara tegasan dengan terikan bagi bahan	3.13

	tidak isotropik	
	3.1.8 Pemalar Lamé	3.20
	3.1.9 Persamaan gelombang dalam * <del>2826</del> isotropik	3.21
	3.1.10 Gelombang Membujur	3.23
	3.1.11 Gelombang Melintang	3.23
	3.1.12 Modulus Young, $E$	3.24
	3.1.13 Nisbah Poisson	3.25
	3.1.14 Parameter Termodinamik (Suhu Debye, $\theta_D$ )	3.28
3.2	Sifat optik bahan amorfus	3.29
	3.2.1 Serapan antara jalur	3.30
	3.2.2 Pinggir penyerapan Urbach	3.33
3.3	Teori kekonduksian ionik	3.49
3.4	Suhu transisi kaca	3.60
3.5	Ringkasan	3.63
<b>4</b>	<b>METODOLOGI</b>	<b>4.1</b>
4.1	Penyediaan kaca	4.1
	4.1.1 Proses Praleburan dan peleburan	4.2
	4.1.2 Pengemasan sampel kaca	4.2
4.2	Pengukuran ketumpatan	4.3
4.3	Pengukuran ultrasonik	4.3
4.4	Pengukuran kekonduksian ionik	4.8
4.5	Pengukuran suhu transisi	4.9
4.6	Pengukuran pinggi penyerapan optik	4.9
4.7	Ringkasan	4.9
<b>5</b>	<b>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN</b>	
5.1	Ciri fizikal dan bagi kaca bismuth litium borat dan kaca bismuth litium fosfat	5.1
	5.1.1 Ketumpatan kaca bismuth litium borat	5.2
	5.1.2 Isipadu molar kaca bismuth litium borat	5.8
	5.1.3 Ketumpatan kaca bismuth litium fosfat	5.10
	5.1.4 Isipadu molar kaca bismuth litium fosfat	5.12
	5.1.5 Suhu transisi $T_g$ bagi kaca bismuth litium borat	5.13
	5.1.6 Suhu transisi $T_g$ bagi kaca bismuth litium fosfat	5.15
	5.1.7 Ringkasan	5.16
5.2	Sifat optik bagi kaca bismuth litium borat dan kaca bismuth litium fosfat	5.17
	5.2.1 Pinggir penyerapan optik	5.17
	5.2.2 Tenaga jurang optik	5.23
	5.2.3 Ringkasan	5.29
5.3	Sifat kekenyalan kaca bismuth litium borat	5.29
	5.3.1 Halaju ultrasonik	5.29
	5.3.2 Modulus Young	5.34
	5.3.3 Modulus Pukul	5.36
	5.3.4 Nisbah Poisson	5.37
	5.3.5 Suhu Debye	5.38

5.3.6	Ringkasan	5.39
5.4	Sifat kekenyalan kaca bismuth litium fosfat	5.39
5.4.1	Halaju ultrasonik	5.39
5.4.2	Modulus Young	5.44
5.4.3	Modulus Pukul	5.47
5.4.4	Nisbah Poisson	5.48
5.4.5	Suhu Debye	5.49
5.4.6	Ringkasan	5.50
5.5	Sifat kekonduksian ionik kaca bismuth litium borat	5.51
5.5.1	Pengenalan	5.51
5.5.2	Penggantungan frekuensi kekonduksian ionik	5.51
5.5.3	Penggantungan suhu kekonduksian ionik	5.54
5.5.4	Ringkasan	5.58
5.6	Sifat kekonduksian ionik kaca bismuth litium fosfat	5.59
5.6.1	Penggantungan frekuensi kekonduksian ionik	5.59
5.6.2	Penggantungan suhu kekonduksian ionik	5.61
5.6.4	Ringkasan	5.64
<b>6</b>	<b>KESIMPULAN</b>	6.1
6.1	Penutup	6.1
6.2	Cadangan kajian lanjutan	6.3
	<b>RUJUKAN</b>	R.1
	<b>LAMPIRAN A</b>	L.1
	<b>LAMPIRAN B</b>	L.18
	<b>BIODATA PENULIS</b>	B.1

## SENARAI JADUAL

Jadual		Muka surat
3.1	Hubungan antara tetanda matriks dengan tetanda tensor.	3.26
3.2	Hubungan antara tetanda tensor dan tetanda ringkas.	3.27
3.3	Perbandingan kebolehsambungan, ketumpatan silang dan nisbah Poisson bagi bahan yang berlainan.	3.41
5.1	Komposisi kaca bismuth litium borat dan fosfat.	5.1
5.2	Senarai kandungan komposisi, ketumpatan, suhu transisi, dan isipadu molar bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ .	5.3
5.3	Senarai kandungan komposisi, ketumpatan, suhu transisi, dan isipadu molar bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ .	5.4
5.4	Senarai kandungan komposisi, ketumpatan, suhu transisi, dan isipadu molar bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ .	5.5
5.5	Senarai kandungan komposisi, ketumpatan, suhu transisi, dan isipadu molar bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ .	5.6
5.6	Senarai kandungan komposisi, ketumpatan dan tenaga jurang optik $E_{\text{opt}}$ bagi kaca bismuth litium borat.	5.23
5.7	Senarai kandungan komposisi, ketumpatan dan tenaga jurang optik $E_{\text{opt}}$ bagi kaca bismuth litium fosfat.	5.23
5.8	Perubahan ketumpatan, halaju membujur, halaju melintang, modulus Young, modulus pukal, suhu Debye dan nisbah Poisson terhadap siri A1-A4 kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ pada suhu bilik.	5.32
5.9	Perubahan ketumpatan, halaju membujur, halaju melintang, modulus Young, modulus pukal, suhu Debye dan nisbah Poisson terhadap siri B1-B4 kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ pada suhu bilik.	5.33
5.10	Perubahan ketumpatan, halaju membujur, halaju melintang, modulus Young, modulus Pukal, suhu Debye dan nisbah Poisson terhadap siri kaca C1-C4 $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ pada suhu bilik.	5.42
5.11	Perubahan ketumpatan, halaju membujur, halaju melintang, modulus Young, modulus Pukal, suhu Debye dan nisbah	5.43

Poisson terhadap siri D1-D4 kaca  $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$   
pada suhu bilik.

- 5.12 Perbandingan tenaga keaktifan di antara sampel kaca bismuth litium borat dan bismuth litium fosfat. 5.55

## SENARAI RAJAH

Rajah		Muka surat
2.1	Skema rangkaian rawak boron-oksigen di dalam kaca boron oksida. (Bulatan terisi ialah atom boron).	2.22
2.2	Skema rangkaian rawak boron-oksigen dengan kehadiran gelung boroxol yang banyak (bulatan terisi ialah atom boron).	2.22
2.3	Model kuasi hablur ( <i>quasicrystalline</i> ) bagi kaca boron oksida. Sudut B-O-B ialah $180^\circ$ (bulatan terisi ialah atom boron).	2.23
2.4	Model molekul, $B_4O_6$ bagi kaca boron oksida. Atom boron (bulatan terisi) kelihatan ditempatkan di luar satah oksigen berkoordinasi.	2.24
2.5	Pecahan $N_4$ atom-atom boron dalam 4-koordinasi (Shaw dan Uhlmann, 1969).	2.28
2.6	Unit asas fosfat tetrahedral yang hadir di dalam kaca fosfat.	2.31
2.7	Struktur kaca fosfat $0.2Li_2O-0.8P_2O_5$ yang disimulasi. Kehadiran saiz cecincin terkecil (3-ahli cecincin) yang dihitamkan. Gambar kecil di hujung mewakili satu cecincin. Titik-titik kecil = Li ; warna gelap = P ; warna cerah = O (Liang <i>et al.</i> , 2000).	2.33
2.8	Susunan dan bilangan atom yang membezakan saiz 2- cecincin, 3- cecincin dan 4- cecincin (Liang <i>et al.</i> , 2000).	2.34
2.9	Struktur kaca fosfat $0.5Li_2O-0.5P_2O_5$ yang disimulasi. Titik-titik kecil = Li ; warna gelap = P ; warna cerah = O. Diperhatikan rantai mendominasi di dalam struktur (salah satu telah dihijaukan) (Liang <i>et al.</i> , 2000).	2.35
2.10	Tenaga daripada pengiraan Hartree-Fock sebagai fungsi sudut ikatan titian P-O-P di dalam kelompok $H_4P_2O_7$ . Sudut ikatan P-O-P untuk gelung fosfat yang berlainan telah ditunjukkan untuk perbandingan (Liang <i>et al.</i> , 2000).	2.35
3.1	(a) Rambatan gelombang membujur (b) Rambatan gelombang melintang.	3.2



3.2	Skema untuk tegasan yang mungkin.	3.3
3.3	Ilustrasi anjakan dan terikan.	3.5
3.4	Gambaran untuk enam komponen terikan.	3.6
3.5	Ilustrasi perubahan nisbah Poisson (terikan sisian/terikan membujur) dengan ketumpatan rangkaian silang semasa tegasan selari dikenakan. Daya yang menentang pemendekkan sisian bertambah dengan ketumpatan rangkaian silang.	3.26
3.6	Hubungan $(\alpha\hbar\omega)^{1/2}$ melawan $\hbar\omega$ .	3.32
3.7	Pinggir penyerapan Urbach bagi bahan amorfus.	3.34
3.8	Rangkaian $B_2O_3$ . Atom bersaiz besar ialah oksigen dan atom bersaiz kecil ialah boron.	3.36
3.9	Struktur tetraborat.	3.38
3.10	Struktur diborat.	3.38
3.11	Rangkaian borat dengan kehadiran atom oksigen bukan titian (NBO).	3.39
3.12	(a) Tempat alternatif ion natrium di dalam unit kutub (b) ion natrium melompat di dalam unit kutub untuk mencetuskan pengutuban orientasi.	3.42
3.13	Pembentukan arah jalan yang dipilih sahaja dengan penyambungan tempat-tempat alternatif yang berdekatan dengan unit struktur polar.	3.43
3.14	Gambaran model keadaan penerowongan yang mengandungi dua paras sistem. Parameter $q$ ialah koordinat konfigurasi, $\Delta$ ialah ketaksimetrian tenaga dan $V$ ialah ketinggian sawar.	3.45
3.15	Perubahan isipadu melawan suhu. Perhatikan bahawa kawasan lampau sejuk telah dibesarkan untuk memaparkan suhu fiktif.	3.48
4.1	Pemegang sampel.	4.7
4.2	Kaedah sampel kaca diapitkan dan disambungkan dengan alat HP 4284A.	4.8

5.1	Perubahan ketumpatan kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-B}_2\text{O}_3$ dengan kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .	5.2
5.2	Perubahan isipadu molar $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-B}_2\text{O}_3$ dengan kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .	5.8
5.3	Perubahan ketumpatan kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-P}_2\text{O}_5$ dengan bilangan mol $y$ .	5.10
5.4	Perubahan isipadu molar terhadap kandungan LiCl bagi kaca bismuth litium fosfat.	5.12
5.5	Graf suhu transisi bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-B}_2\text{O}_3$ lawan kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .	5.13
5.6	Graf suhu transisi bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-P}_2\text{O}_5$ lawan kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .	5.15
5.7	Penyerapan optik sebagai fungsi bagi panjang gelombang dalam julat UV bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ . Rajah sisipan: pekali penyerapan optik, $\alpha$ melawan tenaga foton, $\hbar\omega$ untuk kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ .	5.18
5.8	Penyerapan optik sebagai fungsi bagi panjang gelombang dalam julat UV bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ . Rajah sisipan: pekali penyerapan optik, $\alpha$ melawan tenaga foton, $\hbar\omega$ untuk kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ .	5.19
5.9	Penyerapan optik sebagai fungsi bagi panjang gelombang dalam julat UV bagi kaca kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ . Rajah sisipan: pekali penyerapan optik, $\alpha$ melawan tenaga foton, $\hbar\omega$ untuk kaca kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ .	5.19
5.10	Penyerapan optik sebagai fungsi bagi panjang gelombang dalam julat UV bagi kaca kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ . Rajah sisipan: pekali penyerapan optik, $\alpha$ melawan tenaga foton, $\hbar\omega$ untuk kaca kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ .	5.20
5.11	Hubungan $(\alpha\hbar\omega)^2$ dengan $\hbar\omega$ yang tiada hubungan separa linear bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-LiCl-B}_2\text{O}_3$ .	5.22
5.12	$(\alpha\hbar\omega)^{1/2}$ sebagai fungsi kepada tenaga foton, $\hbar\omega$ untuk kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ .	5.24
5.13	Hubungan $(\alpha\hbar\omega)^{1/2}$ dengan tenaga foton, $\hbar\omega$ bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{B}_2\text{O}_3)_z$ .	5.25

5.14	Hubungan $(\alpha\hbar\omega)^{1/2}$ dengan tenaga foton, $\hbar\omega$ bagi kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ .	5.25
5.15	$(\alpha\hbar\omega)^{1/2}$ sebagai fungsi kepada tenaga foton, $\hbar\omega$ untuk kaca $(\text{Bi}_2\text{O}_3)_x(\text{LiCl})_y(\text{P}_2\text{O}_5)_z$ .	5.26
5.16	Perubahan tenaga jurang optik dengan kandungan LiCl bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.27
5.17	Perubahan tenaga jurang optik dengan kandungan LiCl bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{P}_2\text{O}_5$ .	5.27
5.18	Perubahan halaju membujur terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.30
5.19	Perubahan halaju melintang terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.31
5.20	Perubahan $C_{11}$ dan modulus Young terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi siri A1-A4 kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.34
5.21	Perubahan $C_{11}$ dan modulus Young terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi siri B1-B4 kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.35
5.22	Perubahan $C_{44}$ dan modulus Pukal terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi siri A1-A4 kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.35
5.23	Perubahan $C_{44}$ dan modulus Pukal terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi siri B1-B4 kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{B}_2\text{O}_3$ .	5.36
5.24	Perubahan nisbah Poisson terhadap kandungan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi siri A1-A4 dan B1-B4 kaca bismuth litium borat.	5.38
5.25	Perbandingan suhu Debye antara kaca siri A1-A4 dan B1-B4 bagi kaca bismuth litium borat.	5.39
5.26	Perubahan halaju membujur terhadap kepekatan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{P}_2\text{O}_5$ .	5.41
5.27	Perubahan halaju melintang terhadap kepekatan $\text{Bi}_2\text{O}_3$ bagi kaca $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -LiCl- $\text{P}_2\text{O}_5$ .	5.41
5.28	Perubahan $C_{11}$ dan modulus Young terhadap kandungan LiCl bagi siri kaca C1-C4.	5.45

5.29	Perubahan $C_{11}$ dan modulus Young terhadap kandungan LiCl bagi siri kaca D1-D4.	5.45
5.30	Perubahan $C_{44}$ dan modulus Pukal terhadap kandungan LiCl bagi siri kaca C1-C4.	5.46
5.31	Perubahan $C_{44}$ dan modulus Pukal terhadap kandungan LiCl bagi siri kaca D1-D4.	5.47
5.32	Perubahan nisbah Poisson terhadap kandungan LiCl bagi siri kaca C1-C4 dan D1-D4.	5.49
5.33	Perbandingan suhu debye antara kaca siri A1-A4 dan B1-B4 bagi kaca bismuth litium borat.	5.50
5.34	Kekonduksian lawan frekuensi bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(B_2O_3)_z$ pada suhu 393 K.	5.53
5.35	Kekonduksian lawan frekuensi bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(B_2O_3)_z$ pada suhu 423 K.	5.53
5.36	Kekonduksian lawan frekuensi bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(B_2O_3)_z$ pada suhu 453 K.	5.54
5.37	Plot Arrhenius bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(B_2O_3)_z$ pada 20 Hz. Nilai m mewakili kecerunan graf.	5.57
5.38	Plot Arrhenius bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(B_2O_3)_z$ pada 20 Hz. Nilai m mewakili kecerunan graf.	5.58
5.39	Kekonduksian lawan frekuensi bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(P_2O_5)_z$ pada suhu 303 K.	5.60
5.40	Kekonduksian lawan frekuensi bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(P_2O_5)_z$ pada suhu 423 K.	5.60
5.41	Kekonduksian lawan frekuensi bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(P_2O_5)_z$ pada suhu 453 K.	5.61
5.42	Plot Arrhenius bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(P_2O_5)_z$ pada 20 Hz. Nilai m mewakili kecerunan graf.	5.62
5.43	Plot Arrhenius bagi kaca $(Bi_2O_3)_x(LiCl)_y(P_2O_5)_z$ pada 20 Hz. Nilai m mewakili kecerunan graf.	5.63
5.44	Pergantungan komposisi oleh tenaga keaktifan pada 20 Hz bagi kaca $Bi_2O_3-LiCl-P_2O_5$ .	5.63

7.1	Tetingkap <i>Data Collection</i> .	A.1
7.2	Tetingkap pemilihan <i>Device</i> .	A.1
7.3	Tetingkap <i>Sequences</i> .	A.2
7.4	Tetingkap <i>Sequences</i> .	A.3
7.5	Tetingkap menambah <i>Sequences</i> .	A.3
7.6	Tetingkap memilih <i>Cut</i> .	A.4
7.7	Tetingkap pemilihan eksperimen.	A.4
7.8	Tetingkap <i>Saved Sequences</i> .	A.5
7.9	Tetingkap menyimpan data eksperimen.	A.5
7.10	Tetingkap <i>Procedure</i> .	A.5
7.11	Tetingkap <i>Starts the experiment</i> .	A.6
7.12	Tetingkap eksperimen.	A.6
7.13	Tetingkap memilih <i>Real time drawing</i> .	A.7
7.14	Tetingkap <i>Real time drawing</i> .	A.7
7.15	Tetingkap <i>Direct programming</i> .	A.8
7.16	Tetingkap membuka <i>file</i> eksperimen.	A.8
7.17	Tetingkap pemilihan eksperimen.	A.9
7.18	Tetingkap pemilihan signal eksperimen.	A.9
7.19	Tetingkap graf eksperimen.	A.10
7.20	Tetingkap memilih butang pembesar.	A.10
7.21	Tetingkap graf eksperimen.	A.11
7.22	Tetingkap graf yang sudah diperbesarkan.	A.11
7.23	Tetingkap memilih butang $T_g$ .	A.12
7.24	Tetingkap <i>Heat Flow</i> .	A.12

7.25	Tetingkap graf eksperimen.	A.12
7.26	Tetingkap <i>Glass transition</i> .	A.13
7.27	Tetingkap graf eksperimen.	A.13
7.28	Tetingkap memilih butang A.	A.14
7.29	Tetingkap mengubah nilai suhu.	A.14
7.30	Tetingkap graf yang disediakan.	A.15
7.31	Tetingkap <i>Microsoft Word</i> .	A.15
7.32	Tetingkap <i>Paint</i> .	A.16
7.33	Tetingkap <i>Paint</i> .	A.17
7.34	Tetingkap graf yang sudah dipastekan.	A.17