

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E47289

การตรวจวัดโอโซนหน้าโดยชีวไฟฟ้าปัสเมต-ห่อหุ้มในคาร์บอนคัมพร

นางสาวนันทนา พิเศษราช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

600254255

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E47289

การตรวจวัดโลหะหนักโดยชีวไฟฟ้าปัสเมท-ท่อนาโนคาร์บอนดัดแปร



ปกปิด

นางสาว นันทนา พิเคราะห์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมี ภาควิชาเคมี

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 0 7 2 3 2 2 3 2 3

DETERMINATION OF HEAVY METALS BY BISMUTH–CARBON
NANOTUBE MODIFIED ELECTRODES

Miss Nantana Pikroh

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Chemistry

Department of Chemistry

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

Thesis Title	DETERMINATION OF HEAVY METALS BY BISMUTH– CARBON NANOTUBE MODIFIED ELECTRODES
By	Miss Nantana Pikroh
Field of Study	Chemistry
Thesis Advisor	Parichatr Vanalabhpatana, Ph.D.

Accepted by the Faculty of Science, Chulalongkorn University in
Partial Fulfillment of the Requirements for the Master's Degree

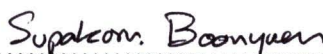
.....Dean of the Faculty of Science
(Professor Supot Hannongbua, Dr. rer. nat.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman
(Assistant Professor Warinthorn Chavasiri, Ph.D.)

..... Thesis Advisor
(Parichatr Vanalabhpatana, Ph.D.)

..... Examiner
(Associate Professor Orawon Chailapakul, Ph.D.)

..... External Examiner
(Assistant Professor Supakorn Boonyuen, Ph.D.)

นันทนา พิเคราะห์ : การตรวจวัดโลหะหนักโดยขั้วไฟฟ้าบิสมัท-ท่อนาโนคาร์บอนดัดแปร
(DETERMINATION OF HEAVY METALS BY BISMUTH-CARBON NANOTUBE
MODIFIED ELECTRODES) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. ปาริฉัตร วนลาภพัฒนา
, 80 หน้า.

E 47289

งานวิจัยนี้ได้สังเคราะห์บิสมัท-ท่อนาโนคาร์บอนคอมพอสิตด้วยกระบวนการพอลิออล เพื่อพัฒนาเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของแคดเมียมและตะกั่วด้วย เทคนิคแควร์เวฟแอนอดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี ได้ศึกษาลักษณะทางโครงสร้างของบิสมัท-ท่อนาโนคาร์บอนคอมพอสิตที่เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคอิเล็กโทรดีพอสิตชัน ทรานสมิซชันอิเล็กตรอน-ไมโครสโคปี และเอเนอร์จีดีสเพอร์ซีฟอิเล็กโทรฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี ขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยบิสมัท-ท่อนาโนคาร์บอนคอมพอสิตแสดงสัญญาณสทริปปิงที่ชัดเจนและแยกออกจากกันได้สำหรับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่ว อีกทั้งค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์สำหรับไอออนของแคดเมียมและตะกั่วเท่ากับ 2.44 และ 3.19 เปอร์เซ็นต์ (ทำซ้ำ 8 ครั้ง) ตามลำดับ สำหรับสารละลาย 25 ไมโครกรัมต่อลิตรของไอออนโลหะทั้งสอง นอกจากนี้ขั้วไฟฟ้าดัดแปรให้ช่วงความเป็นเส้นตรงสองช่วงความเข้มข้น คือ 5 ถึง $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ และ 150 to $240 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ที่ช่วงความเข้มข้นต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.9986 สำหรับไอออนแคดเมียมและ 0.9990 สำหรับไอออนของตะกั่ว ส่วนกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้นของไอออนโลหะ 150–240 ไมโครกรัมต่อลิตร ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็น 0.9983 และ 0.9970 สำหรับไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่ว ตามลำดับ ภายใต้ภาวะการทดลองที่เหมาะสมที่สุดพบว่าขั้วไฟฟ้ากลาสซีคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยบิสมัท-ท่อนาโนคาร์บอนคอมพอสิตให้สัญญาณการตอบสนองที่ดีกว่าขั้วไฟฟ้าฟิล์มบิสมัทแบบ *in situ* บนขั้วท่อนาโนคาร์บอนดัดแปรบนกลาสซีคาร์บอน สุดท้ายได้นำขั้วบิสมัท-ท่อนาโนคาร์บอนดัดแปรบนกลาสซีคาร์บอนไปใช้สำหรับวิเคราะห์หาปริมาณไอออนของโลหะแคดเมียมและตะกั่วในตัวอย่างน้ำประปาและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมพบว่าผลการทดลองที่ได้เป็นที่น่าพอใจ

สาขาวิชา.....เคมี.....ลายมือชื่อ.....นันทนา พิเคราะห์
สาขาวิชา.....เคมี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....อ.ดร. ปาริฉัตร วนลาภพัฒนา
ปีการศึกษา.....2552.....

5072322323: MAJOR CHEMISTRY

KEYWORDS: BISMUTH ELECTRODE / ANODIC STRIPPING VOLTAMMETRY / HEAVY METAL / CARBON NANOTUBE (CNT)

NANTANA PIKROH : DETERMINATION OF HEAVY METALS BY BISMUTH-CARBON NANOTUBE MODIFIED ELECTRODES. THESIS

ADVISOR : PARICHATR VANALABHPATANA, Ph.D., 80 pp.

E 47289

In this research, the bismuth-carbon nanotube (Bi-CNT) composites were synthesized by polyol process and have been developed as working electrodes for the determination of cadmium (II) and lead (II) ions by means of square wave anodic stripping voltammetry. Prepared Bi-CNT composites were characterized by X-ray diffraction (XRD) technique, transmission electron microscopy (TEM), and energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) spectroscopy. Bi-CNT/GC electrode exhibited well-defined and sharp stripping signals for both metal ions and a reproducibility of 2.44% and 3.19% ($n = 8$) for $25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ cadmium (II) and lead (II) ions, respectively. In addition, the modified electrode displayed excellent linear behavior in two concentration ranges: 5 to $150 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and 150 to $240 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. At the lower concentration range, the correlation coefficients (R^2) were 0.9986 for cadmium (II) ion and 0.9990 for lead (II) ion. For the calibration curve from 150 to $240 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, the R^2 of 0.9983 and 0.9970 was obtained for cadmium (II) and lead (II) ions. Under optimal conditions, the Bi-CNT/GC electrode displayed more attractive voltammetric responses than *in situ* bismuth film on CNT modified glassy carbon (*in situ* BiF/CNT/GC) electrode. Finally, the developed electrode was applied to tap water and waste water samples for the analysis of cadmium (II) and lead (II) ions with satisfactory results.

Department :.....Chemistry.....Student's Signature *Nantana Pikroh.*

Field of Study :.....Chemistry.....Advisor's Signature *Parichatr Vanalabhpata*

Academic Year :2009.....

ACKNOWLEDGEMENTS

First of all, I would like to express my gratitude to my advisor, Dr. Parichatr Vanalabhpattana, for continuously providing important guidance and encouragement throughout the course of this research. I also would like to thank my thesis examination committee members, Assist. Prof. Dr. Warinthorn Chavasiri, Assoc. Prof. Dr. Orawon Chailapakul, and Assist. Prof. Dr. Supakorn Boonyuen, who gave their valuable comments and advice in this thesis and I special thank to Assist. Prof. Dr. Natchanan Leepipatpiboon, for valuable suggestions.

I especially want to thank all members of the Electrochemical Research Group for wonderful friendship, suggestion, and encouragement.

I am grateful to the financial supports from Asia Research Center (ARC) and Center for Petroleum, Petrochemicals, and Advanced Materials, Chulalongkorn University.

Finally, I am affectionately thankful to my Pikroh Family and my friends for their unlimited support, belief, and encouragement throughout my education.

CONTENTS

	PAGE
ABSTRACT IN THAI.....	iv
ABSTRACT IN ENGLISH.....	v
ACKNOWLEDGEMENTS.....	vi
CONTENTS.....	vii
LIST OF TABLES.....	xii
LIST OF FIGURES.....	xiii
LIST OF ABBREVIATIONS.....	xvii
CHAPTER I INTRODUCTION.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Literature Review: Development of Bismuth Electrodes.....	3
1.3 Objectives and Scopes of The Thesis.....	9
CHAPTER II THEORY.....	10
2.1 Carbon Nanotube (CNT).....	10
2.1.1 Single-Walled Carbon Nanotube (SWCNT).....	10
2.1.2 Multi-Walled Carbon Nanotube (MWCNT).....	10
2.2 Polyol Process.....	11
2.3 Electrodes for Electrochemical Measurement.....	11
2.3.1 Glassy Carbon (GC) Electrode.....	12
2.3.2 Bismuth Electrode.....	12
2.3.2.1 <i>In Situ</i> Bismuth Film Electrode.....	12
2.3.2.2 <i>Ex Situ</i> Bismuth Film Electrode.....	13
2.3.2.3 Bismuth Modified Electrode.....	13
2.4 Electrochemical Techniques.....	13
2.4.1 Cyclic Voltammetry.....	13
2.4.2 Stripping Analysis.....	15
2.4.2.1 Anodic Stripping Voltammetry (ASV).....	16
2.4.2.2 Square Wave Anodic Stripping Voltammetry (SWASV).....	17
2.4.3 Chronoamperometry.....	17
2.5 Characterization Techniques.....	18

	PAGE
2.5.1 Infrared (IR) Spectroscopy	18
2.5.2 X-ray Diffraction (XRD) Technique	19
2.5.3 Transmission Electron Microscopy (TEM).....	20
2.5.4 Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) Spectroscopy.....	21
CHAPTER III EXPERIMENTAL	23
3.1 Instruments and Apparatus.....	23
3.1.1 Electrochemical Instruments.....	23
3.1.2 Other Characterization Instruments.....	24
3.2 Chemicals.....	25
3.3 Chemical Preparation.....	26
3.3.1 Solutions for The Preparation of Bismuth–CNT (Bi–CNT) Composites.....	26
3.3.1.1 0.5 M Hydrochloric Acid.....	26
3.3.1.2 Mixtures of Bismuth (III) Ions and CNTs.....	26
3.3.2 Electrolyte Solution.....	26
3.3.2.1 0.1 M Acetate Buffer Solution.....	26
3.3.3 Solution for Electrochemical Measurements.....	26
3.3.3.1 100 ppm Cadmium (II) Ions (Stock Solution).....	26
3.3.3.2 100 ppm Lead (II) Ions (Stock Solution).....	27
3.3.3.3 100 ppm Bismuth (III) Ions (Stock Solution).....	27
3.3.3.4 0.5 M Nitric Acid.....	27
3.3.4 Sample Preparation.....	27
3.4 Experimental Procedures.....	27
3.4.1 Purification and Modification of CNTs.....	28
3.4.2 Synthesis of Bi–CNT Composites.....	28
3.4.3 Morphological Studies of CNTs and Bi–CNT Composites.....	28
3.4.4 Preparation of Electrodes.....	28
3.4.4.1 Glassy Carbon (GC) Electrode.....	28
3.4.4.2 CNT Modified Glassy Carbon (CNT/GC) Electrode.....	29
3.4.4.3 Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode.....	29

	PAGE
3.4.5 Electrochemical Characterization of The Modified Electrodes.	29
3.4.5.1 Electrochemical Set-up.....	29
3.4.5.2 Measurement of Background Current.....	30
3.4.6 Determination of Cadmium (II) and Lead (II) Ions by The Modified Electrodes.....	30
3.4.6.1 Electrochemical Set-up.....	30
3.4.6.2 Stripping Analysis by <i>In Situ</i> Bismuth Film on CNT Modified Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiF/CNT/GC) Electrode.....	31
3.4.6.3 Stripping Analysis by Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode.....	31
CHAPTER IV RESULTS AND DISCUSSION.....	32
4.1 Purification and Modification of CNTs	32
4.1.1 Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopic Analysis....	32
4.1.2 X-ray Diffraction (XRD) Analysis.....	33
4.1.3 Transmission Electron Microscopic (TEM) Analysis.....	34
4.2 Morphological Information of Bi–CNT Composites.....	35
4.2.1 X-Ray Diffraction (XRD) Analysis.....	35
4.2.2 Transmission Electron Microscopic (TEM) Analysis.....	36
4.2.3 Energy Dispersive X-ray Fluorescence (EDXRF) Spectroscopic Analysis.....	37
4.3 <i>In Situ</i> Bismuth Film on CNT Modified Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiF/ CNT/GC) Electrode	38
4.3.1 Electrochemical Characterization of CNT Modified Glassy Carbon (CNT/GC) Electrode	38
4.3.2 Electrochemical Responses of <i>In Situ</i> Bismuth Film on CNT Modified Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiF/CNT/GC), <i>In Situ</i> Bismuth Film on Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiF/GC), CNT Modified Glassy Carbon (CNT/GC), and Glassy Carbon (GC) Electrodes towards Cadmium (II) and Lead (II) Ions.....	39
4.3.3 Optimization of Experimental Parameters for The Determina- tion of Cadmium (II) and Lead (II) Ions by <i>In Situ</i> Bismuth	

	PAGE
Film on CNT Modified Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiF/CNT/GC)	
Electrode.....	41
4.3.3.1 Effect of Dioxygen (O ₂).....	41
4.3.3.2 Effect of Nafion.....	42
4.3.3.3 Effect of Bismuth (III) Ion Concentration.....	44
4.3.3.4 Effect of Deposition Potential.....	45
4.3.3.5 Effect of Deposition Time.....	46
4.3.4 Calibration Curves of <i>In Situ</i> Bismuth Film on CNT Modified Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiF/CNT/GC) Electrode.....	48
4.4 Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC)	
Electrode.....	50
4.4.1 Electrochemical Characterization of Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode.....	50
4.4.2 Comparison between Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode and <i>In Situ</i> Bismuth Film on CNT Modified Glassy Carbon (<i>In Situ</i> BiFE/CNT/GC) Electrode towards The Determination of Cadmium (II) and Lead (II) Ions.....	51
4.4.3 Optimization of Experimental Parameters for Determination of Cadmium (II) and Lead (II) Ions by Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode.....	52
4.4.3.1 Effect of Nafion	52
4.4.3.2 Quantity of Bismuth in Bi–CNT Composite.....	53
4.4.3.3 Effect of Deposition Potential.....	55
4.4.3.4 Effect of Deposition Time.....	56
4.4.4 Calibration Curves of Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode.....	57
4.4.5 Stability Studies of Bi–CNT Composite Modified Glassy Carbon (Bi–CNT/GC) Electrode.....	60
4.5 Determination of Cadmium (II) and Lead (II) Ion in Real Water Samples.....	62
CHAPTER V CONCLUSIONS.....	66

	PAGE
5.1 Conclusions.....	66
5.2 Suggestion for Further Work.....	67
REFERENCES.....	68
APPENDICES.....	74
APPENDIX A.....	75
APPENDIX B.....	76
VITA.....	80

LIST OF TABLES

TABLE		PAGE
3.1	List of electrochemical instruments and apparatus.....	23
3.2	List of instruments for characterization.....	24
3.3	List of chemicals.....	25
4.1	Mole percentage of bismuth in Bi–CNT composites.....	38
4.2	Analytical performance of bismuth electrodes for the determination of cadmium (II) and lead (II) ions.....	58
4.3	Determination results for tap water and waste water samples using calibration curve method.....	64
4.4	Determination results from SWASV analysis by Bi–CNT/GC electrode for tap water and waste water samples using standard addition method.....	65
A1	Determination results of interference species in tap water and waste water samples.....	75

LIST OF FIGURES

FIGURE		PAGE
2.1	Potential-time profile used in cyclic voltammetry.....	14
2.2	Typical cyclic voltammogram for a reversible redox process.....	15
2.3	(a) Potential-time waveform and (b) stripping voltammogram of anodic stripping voltammetry.....	16
2.4	Potential-time waveform used in square wave voltammetry.....	17
2.5	Potential-time waveform of chronoamperometry.....	18
2.6	One possible configuration of the XRD instrument.....	19
2.7	Schematic representation of a TEM.....	20
2.8	Schematic representation of an EDXRF spectrometer.....	21
3.1	Electrochemical cell for cyclic voltammetry.....	30
3.2	Electrochemical cell for SWASV.....	31
4.1	FTIR spectra of the (a) unmodified and (b) modified CNTs.....	33
4.2	XRD patterns of the (a) unmodified and (b) modified CNTs.....	33
4.3	TEM images of unmodified CNTs ((a) and (b)) and modified CNTs ((c) and (d)).....	34
4.4	XRD patterns of (a) 1.00, (b) 2.00, (c) 4.00, (d) 6.00, (e) 8.00, (f) 16.00, and (g) 32.00 mol % Bi–CNT composites.....	36
4.5	TEM images of 4.00 mol % Bi–CNT composite.....	37
4.6	Cyclic voltammograms for 0.1 M acetate buffer solution (pH 4.5) recorded with (a) CNT/GC electrode and (b) bare GC electrode at the scan rate of $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	39
4.7	SWASV voltammograms for 0.1 M acetate buffer solution (pH 4.5) containing $25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions recorded with (a) <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrode, (b) <i>in situ</i> BiF/GC electrode, (c) CNT/GC electrode, and (d) GC electrode with the deposition potential of -1.10 V , the deposition time of 120 s, and the scan rate of $7.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	41
4.8	SWASV voltammograms for 0.1 M acetate buffer solution (pH 4.5) containing $25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions recorded with <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrodes in the (a) presence and (b) absence of O_2 using the deposition potential	

FIGURE		PAGE
	of -1.10 V, the deposition time of 120 s, and the scan rate of $7.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	42
4.9	Effect of Nafion amount on the stripping peak currents for $25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solutions (pH 4.5) recorded with <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrodes by SWASV using the deposition potential of -1.10 V, the deposition time of 120 s, and the scan rate of $7.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	43
4.10	Effect of bismuth (III) ion concentration on the stripping peak currents for (a) $25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and (b) $80 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solutions (pH 4.5) recorded with <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.9.....	44
4.11	Effect of the deposition potential on the stripping peak currents for $25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solutions (pH 4.5) recorded with <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.9.....	46
4.12	Effect of the deposition time on the stripping peak currents for $25 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solutions (pH 4.5) recorded with <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.9.....	47
4.13	Calibration plots of (a) cadmium (II) and (b) lead (II) ions from SWASV analysis by <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrodes in 0.1 M acetate buffer solutions using the same experimental conditions as those in Fig. 4.9.....	49
4.14	Cyclic voltammogram for 0.1 M acetate buffer solution (pH 4.5) recorded with 4.00 mol % Bi-CNT/GC electrode at the scan rate of $100 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	50
4.15	SWASV signals obtained from (a) <i>in situ</i> BiF/CNT/GC electrode and (b) 2.00 mol % Bi-CNT/GC electrode for 0.1 M	

FIGURE

PAGE

	acetate buffer solution (pH 4.5) containing $25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions with the deposition potential of -1.10 V , the deposition time of 120 s, and the scan rate of $7.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	51
4.16	Effect of Nafion amount on the stripping currents for $25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solution (pH 4.5) recorded with Bi-CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.15.....	53
4.17	Effect of bismuth content in Bi-CNT composite on the stripping voltammetric responses for $25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solution (pH 4.5) recorded with Bi-CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.15.....	54
4.18	Effect of the deposition potential on the stripping peak currents for $25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solutions (pH 4.5) recorded with 2.00 mol % Bi-CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.15.....	55
4.19	Effect of the deposition time on the stripping peak currents for $25 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ of cadmium (II) and lead (II) ions in 0.1 M acetate buffer solutions (pH 4.5) recorded with 2.00 mol % Bi-CNT/GC electrodes by SWASV using the same experimental conditions as those in Fig. 4.15.....	56
4.20	Calibration plots of (a) cadmium (II) and (b) lead (II) ions from SWASV analysis by 2.00 mol % Bi-CNT/GC electrodes in 0.1 M acetate buffer solutions using the same experimental conditions as those in Fig. 4.15.....	59
4.21	Stability studies of 2.00 mol % Bi-CNT/GC electrodes with (a) 2.00%, (b) 1.50%, (c) 1.00%, and 0.50% Nafion for the determination of (A) cadmium (II) and (B) lead (II) ions by SWASV using the deposition potential of -1.10 V , the deposi-	

FIGURE**PAGE**

tion time of 10 s, the stripping potential from -1.10 to -0.50 V, and the scan rate of $7.5 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$	61
--	----

LIST OF ABBREVIATIONS

A	Ampere
ASV	Anodic Stripping Voltammetry
AAS	Atomic Absorption Spectroscopy
Bi	Bismuth
BiF	Bismuth Film
BiFE	Bismuth Film Electrode
Bi ₂ O ₃	Bismuth Oxide
Cd	Cadmium
CNT	Carbon Nanotube
CE	Counter Electrode
Co	Cobalt
Cl	Chloride
CPE	Carbon Paste Electrode
CPmE	Carbon Paste mini-Electrode
°C	Degree Celsius
O ₂	Dioxygen
DME	Dropping Mercury Electrode
XRF-EDX	Energy Dispersive X-ray Fluorescence Spectroscopy
FTIR	Fourier Transform Infrared
FAAS	Flame Atomic Absorption Spectroscopy
GC	Glassy Carbon
GCE	Glassy Carbon Electrode
GFAAS	Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy
Au	Gold
HMDE	Hanging Mercury Drop Electrode
IUPAC	International Union for Pure and Applied Chemistry
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry
Pb	Lead

LGC	Levitational Gas Condensation
Li	Lithium
Hg	Mercury
MFE	Mercury Film Electrode
M	Metal
MT	Methallothionein
Mo	Molybdenum
MWCNT	Multi-Walled Carbon Nanotube
MCA	Multichannel Analyzer
nm	Nanometer
NCBFE	Nafion Coated Bismuth Film Electrode
NEAs	Nanoelectrode Arrays
Ni	Nickel
Pd	Palladium
Pt	Platinum
ppb	Part Per Billion
ppm	Part Per Million
E	Potential
RE	Reference Electrode
NaBH ₄	Sodium Borohydride
Si	Silicon
SPCE	Screen-Printed Carbon Electrode
SPGCE	Screen-Printed Glassy Carbon Electrode
Ag/AgCl	Silver/Silver Chloride
SWCNT	Single-Walled Carbon Nanotube
Ag	Silver
SWASV	Square-Wave Anodic Stripping Analysis
SIA	Sequential-Injection Analysis
TEM	Transmission Electron Microscopy
V	Volt
WE	Working Electrode
XRD	X-ray Diffraction
ZDCPE	Zeolite Doped Carbon Paste Electrode