

ศักร์ขวางกัันต่ำของจั้วสั้มพัสโลหะกับผลึกเตี๋ยวคอปเปอร์อินเดียมไดซลิไนด์



นายธีระพันธุ์ สันติเทวกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต  
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

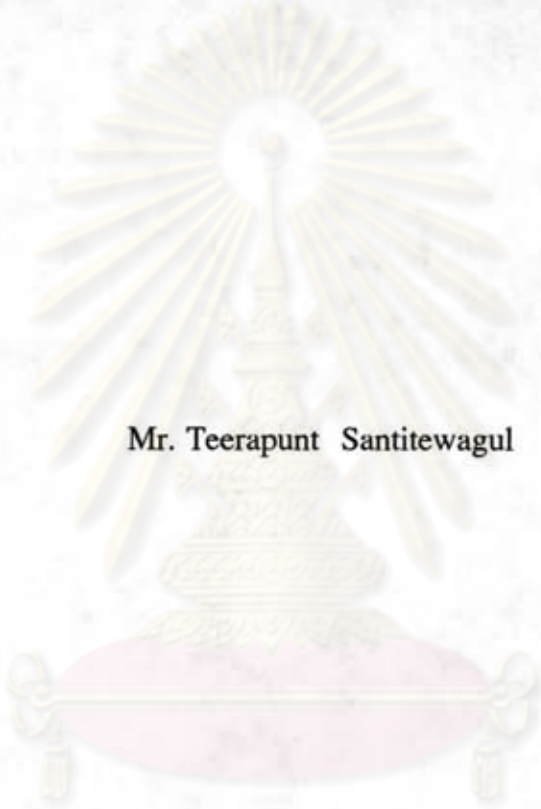
พ.ศ.2537

ISBN 974-584-387-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16๗251๑๐

SMALL POTENTIAL BARRIER OF METAL CONTACTS  
TO COPPER INDIUM DISELENIDE SINGLE CRYSTALS



Mr. Teerapunt Santitewagul

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Doctor of Philosophy

Department of Physics

Graduate School

Chulalongkorn University

1994

ISBN 974-584-387-3

**Thesis Title** Small Potential Barrier of Metal Contacts to Copper Indium  
Diselenide Single Crystals

**By** Mr. Teerapunt Santitewagul

**Department** Physics

**Thesis Advisor** Assistant Professor Somphong Chatraphorn, M.Sc.  
Assistant Professor Kajornyod Yoodee, Ph.D.



Accepted by the Graduate School, Chulalongkorn university in Partial Fulfillment  
of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy of Science

*Thavorn Vajrabhaya*  
..... Dean of Graduate School  
(Professor Thavorn Vajrabhaya, Ph.D.)

**Thesis Committee**

*Virulh Sanyat*  
..... Chairman  
(Professor Virulh Sa-yakanit, F.D.)

*Somphong Chatraphorn*  
..... Thesis Advisor  
(Assistant Professor Somphong Chatraphorn, M.Sc.)

*Kajornyod Yoodee*  
..... Thesis Co-advisor  
(Assistant Professor Kajornyod Yoodee, Ph.D.)

*T. Methasiri*  
..... Member  
(Professor Thamrong Methasiri, F.D.)

*Somsak Panyakeow*  
..... Member  
(Professor Somsak Panyakeow, D.Eng.)

*I. Ming Tang*  
..... Member  
(Professor I. Ming Tang, Ph.D.)

*W. Tantraporn*  
..... Member  
(Dr. Wirojana Tantraporn, Ph.D.)

## C125384 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD : SMALL BARRIER / METAL CONTACTS / COPPER INDIUM DISELENIDE / SINGLE CRYSTAL

TEERAPUNT SANTTEWAGUL : SMALL POTENTIAL BARRIER OF METAL CONTACTS TO COPPER INDIUM DISELENIDE SINGLE CRYSTALS. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. SOMPHONG CHATRAPORN, M.Sc. THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. KAJORNYOD YOODEE, Ph.D. 161 pp. ISBN 974-584-387-3

The main purpose of this work is the presentation of the methods of the measurement and theoretical analysis pertinent to small barriers. The measurement shows that there exists a small Schottky barrier between both Au and p-CuInSe<sub>2</sub> and between Ni and p-CuInSe<sub>2</sub>. The pseudo-Richardson model shows that, for the practical range of current density the contacts are not ohmic down to the range of liquid nitrogen temperature, which is the same range frequently used in activation energy measurement. The basic model for a small barrier shows that light holes contribute more to the tunneling current. There probably is a thin insulator film between the metal (Au, Ni) and p-CuInSe<sub>2</sub>. Au may interact with p-CuInSe<sub>2</sub> and cause a decrease in the doping concentration near the interface. The best ohmic contact on p-CuInSe<sub>2</sub> that could be made from Au, yields a contact resistivity of greater than  $1 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}^2$ . For as-deposited Mo/p-CuInSe<sub>2</sub> the contact is homojunction. For Ni/p-CuInSe<sub>2</sub> contact, there is an interesting phenomenon. There are some ranges of the current and temperature such that, the applied voltage needed across the barrier to sustain the constant current at a low temperature is smaller than that at a higher temperature.

ภาควิชา..... ฟิสิกส์  
สาขาวิชา..... ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา..... ๒๕๓๖

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... สัมพงษ์ ฉัตรพรหม  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ธีระยอด ยอดดี



พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ธีระพันธุ์ สันติเทวกุล : ศักย์ขวางกั้นต่ำของขั้วสัมผัสโลหะกับผลึกเดี่ยวคอปเปอร์อินเดียมไดเซลิไนด์ (SMALL POTENTIAL BARRIER OF METAL CONTACTS TO COPPER INDIUM DISELENIDE SINGLE CRYSTALS)  
อ.ที่ปรึกษา : ผศ. สมพงษ์ ฉัตรภรณ์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. ขจรยศ อยู่ดี,  
161 หน้า. ISBN 974-584-387-3

จุดมุ่งหมายหลักของงานนี้คือการนำเสนอการทดลองและการวิเคราะห์ผลที่เหมาะสมสำหรับศักย์ขวางกั้นต่ำของขั้วสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ จากการวัดพบว่า สำหรับ Au/p-CuInSe<sub>2</sub> และ Ni/p-CuInSe<sub>2</sub> นั้น สามารถตรวจพบศักย์ขวางกั้นต่ำนี้ได้จากแบบจำลองเทียร์ชาร์คสันทำนายว่า สำหรับความหนาแน่นกระแสที่ใช้กันอยู่ในทางปฏิบัติ ขั้วสัมผัสทั้งหมดไม่สามารถปฏิบัติตัวเป็นขั้วสัมผัสโอห์มิกในช่วงอุณหภูมิต่ำได้จนถึงอุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้วัดระดับพลังงานก่อนกัมมันต์ จากการหาความสัมพันธ์ด้วยคอมพิวเตอร์ระหว่างข้อมูลและแบบจำลองพื้นฐานสำหรับศักย์ขวางกั้นต่ำ แสดงให้เห็นว่ากระแสที่เกิดจากการทะลุส่วนใหญ่มาจากโฮลเบา โดยอาจมีชั้นฉนวนบางแทรกอยู่ระหว่างโลหะ (Au, Ni) และสารกึ่งตัวนำ (p-CuInSe<sub>2</sub>) นอกจากนี้ยังพบว่าทองอาจทำให้ความหนาแน่นผู้รับลดลงในบริเวณที่ไม่ห่างจากรอยต่อมากนัก ค่าต่ำสุดของความต้านทานจำเพาะของขั้วสัมผัสทองกับ p-CuInSe<sub>2</sub> ที่มีอยู่ในขณะนี้จะไม่ต่ำกว่า  $1 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}^2$  ส่วน Mo/p-CuInSe<sub>2</sub> นั้นพบว่า ขั้วสัมผัสหลังจากการพอกพูนเป็นรอยต่อเอกพันธ์ สำหรับ Ni/p-CuInSe<sub>2</sub> นั้นมีปรากฏการณ์ที่น่าสนใจคือ ที่บางช่วงของกระแสและอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิต่ำศักย์ขวางกั้นต้องการแรงดันไฟฟ้ามากกว่าที่อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดกระแสไหลคงที่

ภาควิชา .....  
สาขาวิชา .....  
ปีการศึกษา ..... ๒๕๓๖

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... ผศ. สมพงษ์ ฉัตรภรณ์  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... ขจรยศ อยู่ดี



## Acknowledgements

In completing the requirements for the degree of Philosophy, and in carrying out this study, I have been blessed by the help of many people. My profoundest gratitude goes to:

- S. Chatraphorn and Dr. K. Yoodee, for their continuous encouragement, guidance and support as my thesis advisors. They gave much of themselves for me.
- Dr. W. Tantraporn, whose hints and prodding encourage his student to dig deeper into a problem so as to learn enough to independently solve it. This work is based on his previous works.
- Dr. V. Sa-yakanit and all people in FTS room, for their always-ready-and-willing to help.
- P. Songpongs, T. Sutthiopad, S. Chatraphorn junior, S. Tungasmita, and S. Wongmaneroj, for their helps and suggestions on computer program.
- C. Pewlong, for his suggestions on solving electronic problems.
- T. Burinprakhon, for molybdenum sputtering.
- K. Eaiprasertsak, for her crystals preparation.
- Dr. M. SeaDan and T. Navarat, their graphics work which adds polish to this thesis.
- P. Pongpai, always willing to help and cheer me.

T. Santitewegul.



## TABLE OF CONTENTS

	page
<i>ABSTRACT IN ENGLISH</i> .....	iv
<i>ABSTRACT IN THAI</i> .....	v
<i>ACKNOWLEDGMENTS</i> .....	vi
<i>LIST OF FIGURES</i> .....	xi
<i>LIST OF TABLES</i> .....	xv
Chapter I INTRODUCTION.....	1
Chapter II METAL-SEMICONDUCTOR CONTACTS.....	4
– The Schottky and Bardeen Models of Metal Semiconductor Contacts.....	4
– Mechanism of Barrier Formation.....	6
– Current Transport Mechanisms Through the Schottky Barrier.....	8
– Definitions of Ohmics Contact.....	10
– Contact Resistivity.....	11
– The Effect of an Interfacial Layer.....	13
Chapter III PREVIOUS WORKS.....	14
– Ohmic Contact to p-CuInSe <sub>2</sub> .....	14
– Determination of Low Barrier Height in MS Contacts.....	17
– Different Area Constant Current Technique (DACCT).....	17

	- The Pseudo-Richardson Model.....	19
Chapter IV	THEORETICAL MODELS.....	22
	- Restatement of Pseudo-Richardson Model.....	23
	- The Criterion of the Ohmic Contact.....	24
	- Basic Conduction Across a Small Barrier.....	24
	- Consideration on Fitting Theoretical Expression to Experimental Data.....	24
	- The Basic Model For a Small Barrier.....	30
Chapter V	EXPERIMENT.....	37
	- Substrate Preparation and Metal Deposition.....	38
	- Typical Results of DACCT Measurement.....	41
	- The Total Resistance and the Maximum Contact Resistivity of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> and Ni/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	55
	- Contact Resistivity of Mo/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	58
	- Contact Resistivity by Approximate Measurement....	60
Chapter VI	CALCULATIONS AND RESULTS.....	63
	- Richardson Plot and Effective Contact Resistance $R_C(\text{prm})$ .....	63
	- Fitting Process and Effective Contact Resistance $R_C(\text{fit})$ .....	67



– Fitting Process.....	67
– The Result From Au/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	68
– The Result From Ni/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	78
– Effective Contact Resistance R <sub>c</sub> (fit).....	87
Chapter VII DISCUSSION.....	90
– The DACCT Measurement .....	90
– The Pseudo-Richardson Model.....	91
– The Ohmic Range of the Best Au/p-CuInSe <sub>2</sub> contact .....	95
– General Discussion of the Fitting Process.....	96
– The Significant Barrier Parameters for Au/p-CuInSe <sub>2</sub> Contact.....	98
– The Expectation Value of The Lowest Contact Resistivity of Near Stoichiometry Substrates.....	99
– The Decrease in the Doping Concentration Near the Interface of Some Au/p-CuInSe <sub>2</sub> Contacts.....	101
– The Effect of Nonhomogeneity in a Substrate.....	102
– The Mo/p-CuInSe <sub>2</sub> Contact.....	102
– The Anti-Richardson Behavior of the Ni/p-CuInSe <sub>2</sub> Contact.....	103
Chapter VIII CONCLUSION.....	113

<i>REFERENCES</i> .....	116
<i>APPENDIX A</i> .....	119
<i>APPENDIX B</i> .....	124
<i>APPENDIX C</i> .....	129
<i>CURRICULUM VITAE</i> .....	161



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## LIST OF FIGURES

	page
Fig.1 Conduction mechanisms for metal/p-semiconductor contacts with increasing semiconductor doping concentration.....	9
Fig.2 Schematic drawing of small area metal-semiconductor-large area metal used in DACCT measurement.....	18
Fig.3 Typical Result in DACCT measurement for high bulk resistivity.....	18
Fig.4 Equi-error-surface in three-dimensional parameter space.....	29
Fig.5 Quantities used in the basic model.....	31
Fig.6 Sample data of the DACCT measurement.....	42
Fig.7a Replotted data of #C3/20 for constant current 0.01 mA.....	43
Fig.7b Replotted data of #C3/20 for constant current 0.03 mA.....	44
Fig.7c Replotted data of #C3/20 for constant current 0.1 mA.....	45
Fig.7d Replotted data of #C3/20 for constant current 0.3 mA.....	46
Fig.7e Replotted data of #C3/20 for constant current 1.03 mA.....	47
Fig.7f Replotted data of #C3/20 for constant current 4.95 mA.....	48
Fig.8a Replotted data of #C3/25/2 for constant current 0.01 mA.....	49
Fig.8b Replotted data of #C3/25/2 for constant current 0.03 mA.....	50
Fig.8c Replotted data of #C3/25/2 for constant current 0.1 mA.....	51
Fig.8d Replotted data of #C3/25/2 for constant current 0.3 mA.....	52
Fig.8e Replotted data of #C3/25/2 for constant current 1.03 mA.....	53
Fig.8f Replotted data of #C3/25/2 for constant current 4.95 mA.....	54

Fig.9 Schematic drawing of total resistance measurement.....	55
Fig.10 I-V characteristics of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	55
Fig.11 Typical I-V characteristics of Mo/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	58
Fig.12 Four probes configuration.....	60
Fig.13 Typical I-V characteristics of four probes measurement.....	61
Fig.14 Richardson plot for determining the active area.....	64
Fig.15a Recalculated and experimental data points of #C3/20 for constant current 0.01 mA.....	72
Fig.15b Recalculated and experimental data points of #C3/20 for constant current 0.03 mA.....	73
Fig.15c Recalculated and experimental data points of #C3/20 for constant current 0.1 mA.....	74
Fig.15d Recalculated and experimental data points of #C3/20 for constant current 0.3 mA.....	75
Fig.15e Recalculated and experimental data points of #C3/20 for constant current 1.03 mA.....	76
Fig.15f Recalculated and experimental data points of #C3/20 for constant current 4.95 mA.....	77
Fig.16a Recalculated and experimental data points of #C3/25/2 for constant current 0.01 mA.....	81
Fig.16b Recalculated and experimental data points of #C3/25/2 for constant current 0.03 mA.....	82

Fig.16c Recalculated and experimental data points of #C3/25/2 for constant current 0.1 mA.....	83
Fig.16d Recalculated and experimental data points of #C3/25/2 for constant current 0.3 mA.....	84
Fig.16e Recalculated and experimental data points of #C3/25/2 for constant current 1.03 mA.....	85
Fig.16f Recalculated and experimental data points of #C3/25/2 for constant current 4.95 mA.....	86
Fig.17 $R_c(\text{fit})$ of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	88
Fig.18 Comparison of split temperatures for cases of TE, TFE and neglect TE.....	91
Fig.19 The decrease in the doping concentration near the interface of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> contact.....	101
Fig.20 The rectangular barrier of p-type semiconductor under reverse bias.....	106
Fig.21 The Schottky barrier of p-type semiconductor under reverse bias.....	119
Fig.22a The voltage source of the step constant current.....	125
Fig.22b The oscillator part.....	125

Fig.22c The constant current selector part..... 125

Fig.22d The constant current source part..... 126

Fig.22e The trigger part..... 127

Fig.22f The detail of flip-flop..... 127



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### LIST OF TABLES

Table1 Resistivity and carrier concentration of substrates.....	39
Table2 Total resistance of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> and Ni/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	57
Table3 Contact resistivity of Mo/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	59
Table4 Contact resistivity of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> by direct measurement.....	62
Table5 B <sub>eff</sub> , A <sub>eff</sub> and R <sub>c</sub> (prm) of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> and Ni/p-CuInSe <sub>2</sub> ....	66
Table6 Computer fitting for #C3/20.....	69
Table7 Fitting parameters for Au/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	71
Table8 Computer fitting for #C3/25/2.....	78
Table9 Effective contact resistance R <sub>c</sub> (fit) of Au/p-CuInSe <sub>2</sub> .....	89
Table10 Comparison between A <sub>app</sub> and A <sub>app</sub> A* for Au/p-CuInSe <sub>2</sub> ....	93
Table11 Flux distribution of rectangular barrier at 100 and 200 K.....	108

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย