ความหนาแน่นสถานะในสารกึ่งตัวนำชนิดโดปอย่างหนักซึ่งถูกชดเชยอย่างรุนแรงด้วยสหสัมพันธ์การแจกแจงของสารเจือปน

นายอุทัย ปิ่นม่วง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3700-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DENSITY OF STATES IN HEAVILY DOPED STRONGLY COMPENSATED SEMICONDUCTORS WITH CORRELATED IMPURITY DISTRIBUTION

Mr. Uthai Pinmuang

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science in Physics

Department of Physics

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-3700-9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Thesis Title	Density of States in Heavily Doped Strongly Compensated Semiconductors with Correlated Impurity Distribution
By	Uthai Pinmuang
Field of Study	Physics
Thesis Advisor	Associate Professor Wichit Sritrakool, Ph.D.
Thesis Co-advisor	Professor Virulh Sa-yakanit, F.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 Piamsak Menasveta, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

..... Chairman
(Assistant Professor Kajornyod Yoodee, Ph.D.)

..... Thesis Advisor
(Associate Professor Wichit Sritrakool, Ph.D.)

..... Thesis Co-advisor
(Professor Virulh Sa-yakanit, F.D.)

..... Member
(Assistant Professor Chaisingh Poo-Rakkiat, Ph.D.)

..... Member
(Somchai Kiatgamolchai, Ph.D)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อุทัย ปิ่นม่วง : ความหนาแน่นสถานะในสารกึ่งตัวนำชนิดโดปอย่างหนักซึ่งถูกชดเชยอย่างรุนแรงด้วยสหสัมพันธ์การแจกแจงของสารเจือปน. (DENSITY OF STATES IN HEAVILY DOPED STRONGLY COMPENSATED SEMICONDUCTORS WITH CORRELATED IMPURITY DISTRIBUTION) อ. ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร. วิชิต ศรีตระกูล, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศาสตราจารย์ ดร.วิรุฬห์ สายคณิต จำนวนหน้า 68 หน้า. ISBN 974-17-3700-9.

วิทยานิพนธ์นี้เราศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดโดปอย่างหนักที่มีการชดเชยอย่างรุนแรง โดยใช้วิธีอินทิเกรตตามวิถีของฟายน์แมนซึ่งพัฒนาโดยสายคณิตสำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดโดปอย่างหนัก ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ของระบบนี้นำมาจากงานของกัลเปิร์นกับเอฟรอส เราได้คำนวณเชิงวิเคราะห์สำหรับค่าความหนาแน่นสถานะที่หางของแถบพลังงาน และพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่ถูกกัก พร้อมทั้งค่ายกกำลังวิกฤต อีกทั้งยังได้แสดงผลการคำนวณเชิงตัวเลข เนื่องด้วยผลที่ถูกชดเชยอย่างรุนแรงเราได้ค่ายกกำลังวิกฤตจาก 1 ถึง 2 แทนที่จะมีค่าจาก 1/2 ถึง 2 ตามที่เคยได้ศึกษามาแล้วในกรณีสารกึ่งตัวนำชนิดโดปอย่างหนัก เราชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในระบบนี้มีลักษณะคล้ายคลึงกับปัญหาของหางเออร์บาค เมื่อสารเจือปนมีมากจนกระทั่งระยะห่างมีค่าเข้าสู่มาตราส่วนระดับอะตอม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชาฟิสิกส์	ลายมือชื่อนิสิต.....อุทัย ปิ่นม่วง.....
สาขาวิชาฟิสิกส์	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4372498123 : MAJOR PHYSICS
KEY WORD: PATH INTEGRALS / HEAVILY DOPE STRONGLY COMPENSATED SEMICONDUCTORS / DENSITY OF STATES

UTHAI PINMUANG : DENSITY OF STATES IN HEAVILY DOPED STRONGLY COMPENSATED SEMICONDUCTORS WITH CORRELATED IMPURITY DISTRIBUTION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. WICHIT SRITRAKOOL, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR : PROF. VIRULH SA-YAKANIT, 68 pp. ISBN 974-17-3700-9.

In this thesis, we study the behavior of an electron in a heavily doped semiconductors with strong compensation using the Feynman path integral method developed by Sa-yakanit for treating the heavily doped semiconductors. The correlation function of this system is taken from Galpern and Efros. The density of states of the band tail, the kinetic energy of localization as well as the critical exponent are calculated analytically. Numerical results are also presented. Due to the compensation, the critical exponent varies from 1 to 2 instead of from 1/2 to 2 as in the case of heavily doped semiconductors. We point out that this behavior is resemble to the Urbach tail problem where the impurities approach the atomic scale.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Physics — Student's signature.....Uthai Pinmuang.....
Field of study Physics — Advisor's signature.....Wichit Sritrakool.....
Academic year 2003 — Co-advisor's signature.....Virulh Sa-yakanit.....

Acknowledgements

First of all I like to express my wholehearted love to my father and mother for their love and support. I also owe a lot to my brothers, sisters and friends. I want to mention my sincere gratitude to my advisor, Associate Professor Wichit Sritrakool and co-advisor, Professor Virulh Sayakanit. Many thanks to Assistant Prof. Kajornyod Yoodee, Assistant Prof. Chaisingh Poo-Rakkiat and Dr. Somchai Kiatgamolchai for criticizing the manuscript. Any errors in this thesis is my sole responsibility.

I also thank people at the Physics Department for a good atmosphere. Many thanks to Assistant Prof. Udomsilp Pinsook and Mr. Pornjuk Srepusharawoot for their helps. I am indebted to Mr. Boonlit Krunavakarn for his suggestion and assistance in calculating many parts of the thesis and Mr. Apirath Poosittrakul for his help with numerical calculation. Finally, I want to thank my sisters, brothers and friends of the Forum for Theoretical Science: Miss Khattiya Chalapat, Miss Orapin Niamploy, Miss Suphatra Adulrattananuwat, Mr. Porncharoen Palotaidamkerng, Mr. Kobchai Tayanasanti, Mr. Komin Kaewphaluk, Mr. Anusit Thongnum and Miss Nadda Nusso for their support.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Contents

Abstract in Thai iv
Abstract in English v
Acknowledgements vi
Contents vii
List of Tables ix
List of Figures x
Chapter 1 Introduction 1
Chapter 2 Feynman's Path Integral Theory ... 4
2.1 Feynman's Propagator 4
2.2 Path Integral of Free Particle 8
2.3 The Quadratic Lagrangian 9
2.4 Path Integral of Harmonic Oscillator 13
2.5 Functionals and Functionals Derivatives 15
Chapter 3 Heavily Doped Strongly Compensated Semiconductors Model 19
3.1 Edwards' Model 19
3.2 The Autocorrelation Function 23
3.3 The Density of States 25
3.4 The Variational Method 27
3.5 The Trial Propagator 29
Chapter 4 The Approximate Density of States 33
4.1 The Approximate Propagator 33

Contents (cont.)

4.2 Calculations of $\vec{A}$, B and $\left\langle (\vec{x}(\tau) - \vec{x}(\sigma))^2 \right\rangle_{s_0(\omega)}$ 37

4.3 Evaluating the Approximate

Density of States.....41

4.4 Results.....51

Chapter 5 Discussions and Conclusions.....55

References 63

Vitae.....68

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

List of Tables

Table Page

Table 4.1 Numerical results of v and z for a strong screening [$v << 1$ and $z \rightarrow \infty$]. 52

Table 4.2 Numerical results of v and z for a weak screening [$v >> 1$ and $z \rightarrow 0$] 53

Table 4.3 The limiting values of $a(v)$, $b(v)$, $n(v)$ and $T(v)/v$ calculated from the present method for the case of a screened Coulomb potential. 53

Table 4.4 Numerical results of the function $a(v)$, $b(v)$, $n(v)$ and $T(v)/v$ for a screened Coulomb potential. 54

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

List of Figures

Figure Page

Figure 2.1 Diagram showing the sum over paths defined as a limit, in which at first the path is specified by giving only its coordinate x at a large number of specified times separated by very small interval ϵ. The path sum is then an integral over all these specific coordinates. Then to achieve the correct measure, the limit is taken as ϵ approaches zero [8] 7

Figure 2.2 The difference between the classical path $\bar{x}(t)$ and some possible alternative path $x(t)$ is the function $y(t)$ [8] 11

Figure 3.1 The exponential of the weighted average of x, $e^{\langle x \rangle}$, must lie below the weighted average of the exponentials $\langle e^x \rangle$. The value of $e^{\langle x \rangle}$ must lie in the curve, but $\langle e^x \rangle$, the center of gravity of the several points, must lie above the curve [8] 28

Figure 5.1 Plot of the preexponential $a(\upsilon)$ and exponent $b(\upsilon)$ versus dimensionless energy υ 59

Figure 5.2 Plot of logarithmic derivative $n(\upsilon) = d \ln b(\upsilon)/d \ln \upsilon$ of the exponent $b(\upsilon)$ versus the dimensionless energy υ 60

Figure 5.3 Plot of the ratio of the kinetic energy to the binding energy $T(\upsilon)/\upsilon$ versus the dimensionless energy υ 61

Figure 5.4 Density of states in the tail of HDCS GaAs. 62