ปรากฏการณ์ไอโซโทปในสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง

นายพูล ยิ่งประทานพร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-170-928-5

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 20469639

ISOTOPE EFFECT IN HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS

Mr. Pool Yingpratanporn

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 2002

ISBN 974-170-928-5

Thesis Title	Isotope Effect in High Temperature Superconductors
Field of study	Physics
By	Mr. Pool Yingpratanporn
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Wichit Sritakool
Thesis Co-Advisor	Prof. Suthat Yoksan

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

.....Dean of Faculty of Science

(Associate Professor Wanchai Phothiphichitr, Ph.D.)

THESIS COMMITTEE

.....Chairman

(Associate Professor Kitt Visoottiviseth, Ph.D.)

Wichit Sritakool .....Thesis Advisor

(Associate Professor Wichit Sritakool, Ph.D.)

Suthat Yoksan .....Thesis Co-Advisor

(Professor Suthat Yoksan, Ph.D.)

Kajornyod Yoodee .....Member

(Assistant Professor Kajornyod Yoodee, Ph.D.)

.....Member

(Sojiphong Chatraphorn, Ph.D.)

พูล ยิ่งประทานพร : ปรากฏการณ์ไอโซโทป ในสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง. (ISOTOPE EFFECT IN HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. วิชิต ศรีตระกูล , อ. ที่ปรึกษาร่วม : ศ. ดร. สุทัศน์ ยกส้าน จำนวนหน้า 89 หน้า. ISBN 974-170-928-5

จุดมุ่งหมายของวิทยานิพนธ์นี้ คือ เพื่อศึกษาปรากฏการณ์ไอโซโทป ในสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง ซึ่งได้มีการทดลองพบว่า สัมประสิทธิ์ไอโซโทป มีค่าน้อย ≈ 0-0.2 เมื่อเทียบกับค่าที่ทฤษฎีตัวนำยวดยิ่งของ บาร์ดีน คูเปอร์ และชรีฟเฟอร์ (Bardeen, Cooper, and Schrieffer, BCS) ได้ทำนายไว้ คือ 0.5 จึงแสดงว่า มีอันตรกิริยาอื่นที่สำคัญยิ่งกว่าอันตรกิริยาอิเล็กตรอน-โฟนอน ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง. ในการทดลองศึกษาสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง ได้มีการพบว่า ในตัวนำนี้มีช่องว่างพลังงานเทียม (pseudogap) ที่มีสมมาตรลักษณะที่ ขึ้นกับทิศทาง ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต. งานวิจัยนี้ จะอธิบายปรากฏการณ์ไอโซโทปที่ไม่ปกติ ในตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง โดยพิจารณาอันตรกิริยา อิเล็กตรอน-โฟนอน และแรงผลักคูลอมบ์ทั้งที่ไม่ขึ้นกับทิศทาง และขึ้นกับทิศทาง เมื่อตัวนำยวดยิ่งมีช่องว่างพลังงานเทียมในแถบพลังงานกระตุ้นของอนุภาคเดี่ยว และผลการคำนวณที่ได้ แสดงให้เห็นความสำคัญของพารามิเตอร์ต่างๆและของช่องว่างพลังงานเทียมต่อค่าสัมประสิทธิ์ไอโซโทป

ภาควิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่อนิสิต พูล ยิ่งประทานพร

สาขาวิชา ฟิสิกส์ ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา วิชิต ศรีตระกูล

ปีการศึกษา 2545 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม สุทัศน์ ยกส้าน

4272356623 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: BCS / HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTIVITY/ ISOTOPE EFFECT/ PSEUDOGAP / VANHOVE SINGURARITY

POOL YINGPRATANPORN : ปรากฏการณ์ไอโซโทป ในสารตัวนำยวดยิ่งอุณหภูมิสูง. (ISOTOPE EFFECT IN HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS) THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. WICHIT SRITAKOOL Ph.D., THESIS CO-ADVISOR : PROF. SUTHAT YOKSAN Ph.D., 89 pp. ISBN 974-170-928-5

The purpose of this thesis is to investigate the isotope effect in high temperature superconductors, where experimental results show small isotope effect coefficients of 0-0.2 in contrast to the conventional superconducting theory (Bardeen, Cooper, and Schrieffer, BCS) , which predicts the isotope effect coefficient to be 0.5. This leads to suggestions that there are many predominantly pairing interactions which a possible small electron-phonon mediated interaction. An effort to answer the question of the unusual isotope effect coefficients observed in high temperature superconductors might be related to the presence of the pseudogap having anisotropic symmetries at temperatures higher than the critical temperature. In this research I give an explanation for an unusual isotope effect in high temperature superconductors by considering the electron-phonon mediated interaction with an additional Coulomb repulsion interaction for isotropic and anisotropic pairing states in the presence of the pseudogap in the single particle excitation energy spectrum. The results give the exact isotope effect coefficient expression which depends on material parameters and the size of the pseudogap.

Department Physics ..... Student's signature Pool Yingpratanporn

Field of study Physics ..... Advisor's signature Wichit Sritakool

Academic year 2002 Co-advisor's signature Suthat Yoksan

Acknowledgments

I wish to express grateful thanks to Assoc. Prof. Wichit Sritakool, my advisor , for his motivation, and guidance throughout the course of investigation.

I would like to express my gratitude to Prof. Suthat Yoksan, my thesis co-advisor, for his encouragement and helps in various ways.

I also would like to thank Assoc. Prof. Kitt Visoottiviseth, Assist. Prof. Kajornyod Yoodee, and Dr. Sojiphong Chatraphorn for serving on the thesis committee.

Table of Contents

	Page
Abstract in Thai	iv
Abstract in English	v
Acknowledgments	vi
List of Tables	ix
List of Figures	x
Forward	xii
Chapter 1 Fundamental Properties of Superconductors	1
1.1 Introduction	1
1.2 The Meissner effect	1
1.3 Persistent currents and flux quantization	3
1.4 Specific heat	4
1.5 Isotope effect	4
1.6 The London equations for a superconductor	5
1.7 Microscopic Theory of Superconductivity	6
1.7.1 The electron-phonon interaction	6
1.7.2 The Cooper pairs	7
1.7.3 The ground state energy	8
1.7.4 The energy gap at 0 K	12
1.7.5 The superconductor at finite temperatures	12
Chapter 2 High-Temperature Superconductivity	16
2.1 Introduction	16
2.2 Structural and Electronic Properties of the Cuprates	17
2.3 The Physics of High-Temperature Superconductivity	21
2.4 Summary of Experimental Results and Theoretical Interpretations ...	24
2.5 Symmetry of Superconducting Order Parameter	27
Chapter 3 Isotope Effect in high temperature superconductors	29
3.1 Introduction	29

Page

3.2 The Van Hove Scenario 30

3.3 Van Hove Singularity in the Density of States 31

3.4 Isotope effect in high-temperature superconductors within Van Hove scenario 36

3.5 Effect of doping and impurities on the isotope effect in high-temperature superconductors 47

3.6 Physics of the pseudogap 47

3.7 Isotope effect in the presence of a pseudogap 48

Chapter 4 High-Temperatures Isotope effect in the presence of a pseudogap 57

References 71

Vitae 77

List of Tables

Table Page

1-1 Experimental values of α in $M^{\alpha}T_c$ = constant 4

2-1 Normal state and superconducting properties of $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 26

3-1 T_c estimates based on Eqs.(3.22) and (3.23) 37

3-2 T_c estimates for a DOS with a VHS at the Fermi level 39

3-3 Values of T_c and α calculated from Eqs. (3.45) and (3.46) 46

List of Figures

Figure Page

1-1 Schematic diagram of exclusion of magnetic flux from the interior of a massive superconductor 1

1-2 Phase diagram of the critical magnetic field vs. temperature 2

1-3 ,1-4 The reversibility of the superconducting transition 3

1-5 An electron of wave vector $\vec{k}$ emits a virtual phonon $\vec{q}$ which is absorbed by an electron $\vec{k}'$ 7

1-6 Concentric circles of radii k_F-δ and k_F+δ from two points separated by K 8

2-1 Superconductivity Time line from 1900 to 1986 16

2-2 Superconductivity Time line for 1986 - 1987 17

2-3 The crystal structures of the *T*, *T**, and *T'* phase cuprate 214 compounds 18

2-4 The phase diagram of cuprate superconductors 19

2-5 The crystal structure of R123 compounds 20

2-6 The crystal structures of Tl and Hg-based cuprates 21

2-7 Critical temperature (T_c) versus Sommerfeld constant γ 22

3-1a Density of states, N(E), for $r_1 = 0.9$ and $r_2 = 0.2$ 33

3-1b Calculated results of T_c and α based on Eqs.(3.16) and (3.19) 35

3-2 Variation of the transition temperature (T_c) with δ/ω_D for different coupling parameters 39

3-3 Plot of the isotope-shift exponent α vs (δ/ω_D) 41

3-4 Isotope effect exponent as a function of δ/ω_D for increasing values of C 43

3-5 Isotope effect exponent as a function of T_c 43

3-6 α~x curve for $YBa_2Cu_3O_{6+x}$ 44

3-9 Schematic plots of the temperature dependence of the d-wave gap maximum Δ(T) for ^{16}O isotope exchange and ^{18}O exchange 51

3-8 Raman spectra from ^{16}O- exchanged and 90% ^{18}O-exchanged Y-124 51

3-9 Weak coupling result for the isotope exponent α/α_0 as a function of T_c/T_{co} in the presence of a pseudogap 55

Figure Page

4-1 Values of α in the presence of the pseudogap for E_{go}/T_c=0.1 (a) and E_{go}/T_c=1 (b) with respect ω_p/T_c 62

4-2 Values of α in the presence of the pseudogap (E_{go}/T_c=1) for the phononic part dominant (a) and for electronic part dominant (b) with respect to ω_p/T_c ... 64

4-3 Values of α for $d_{x^2-y^2}$ -wave in the presence of the pseudogap for E_{go}/T_c=0.01 (a)E_{go}/T_c=0.1 (b) and E_{go}/T_c=1 (c) with respect to ω_p/T_c 66

4-4 Values of α for $d_{x^2-y^2}$-wave type in the presence of the pseudogap (E_{go}/T_c=0.1) for the phononic part dominant (a) and for electronic part dominant (b) with respect to ω_p/T_c 68

Forward

In this thesis, I investigate the isotope effect in high temperature superconductors. The thesis is organized as follows: In chapter 1, the introduction of the fundamental properties and isotope effect in conventional superconductors is mentioned. In chapter 2, I study the theory of the high-temperature superconductivity which presents a serious challenge to the conventional superconductivity theory. In chapter 3, I examine the effectiveness of the Van Hove singularity as an attempt to describe the unusual isotope effect in high temperature superconductors and then the pseudogap is introduced and its influence that may give the explanation for the unusual isotope effect in high temperature superconductors. Finally, I examine the isotope effect in the presence of a pseudogap by considering the framework of T.Dahm [83] who gave the isotope effect coefficient expression which is an only approximate expression , I therefore wish to reconsider the isotope effect in the presence of a pseudogap and attempt to calculate the phenomenon quantitatively with the exact solutions. The theoretical formulation will be given and the numerical results will be shown in chapter 4.