

# Fabrications and Characteristics of High-Tc Superconducting Quantum Interference Device

張耿銘、陳昭翰、陳盛基

E-mail: 9419758@mail.dyu.edu.tw

## ABSTRACT

For the development of homemade dc superconducting quantum interference device (dc SQUID) controller, it needs to fabricate a lot of dc SQUIDs. This thesis focuses on the process of high-Tc dc SQUIDs and the related technology. The Josephson junctions are formed by two different methods: 1. Step-edge SrTiO<sub>3</sub> substrate fabricated by using diamond-like carbon thin film 2. SrTiO<sub>3</sub> bicrystal substrate The single layer YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin film is growth by magnetron sputtering and pulsed laser deposition for fabricating high-Tc dc SQUIDs. The results show that only the high-Tc dc SQUIDs work that are fabricated with the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin film growth on SrTiO<sub>3</sub> bicrystal substrates by pulsed laser deposition. From the relation of resistance versus temperature and the images of scanning electron microscope, the failure of dc SQUIDs fabricated with the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin film growth on step-edge SrTiO<sub>3</sub> substrates is caused by the poor quality of substrates. Because of the rough surface of step-edge SrTiO<sub>3</sub> substrates, it leads to poor quality of YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin film. As to the YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> thin film growth on SrTiO<sub>3</sub> bicrystal substrates by magnetron sputtering to fabricate dc SQUIDs also fail. The reason is still unknown it needs more studies.

Keywords : dc SQUID、diamond-like carbon、magnetron sputtering、and step-edge.

## Table of Contents

封面內頁 簽名頁 授權書 . . . . .	iii	中文摘要 . . . . .	iii
. . . . .	iv	英文摘要 . . . . .	v
. . . . .	vi	目錄 . . . . .	vii
. . . . .	x	表目錄 . . . . .	xiii
第一章 序論 1.1 前言 . . . . .	1	1.2 高溫超導量子干涉元件之應用 . . . . .	1
. 2 1.3 研究目的 . . . . .	2	第二章 直流超導量子干涉元件之原理 2.1 超導體的基本特性 . . . . .	4
. . . . .	4	2.1.1 臨界溫度 . . . . .	4
. . . . .	4	2.1.2 零電阻 . . . . .	4
. . . . .	4	2.1.3 抗磁性 (Diamagnetism) . . . . .	5
6 2.2 約瑟夫森接面 (Josephson junctions) . . . . .	6	2.2.1 直流約瑟夫森效應 . . . . .	6
. . . . .	6	2.2.2 約瑟夫森接面的等效電路模型 . . . . .	8
9 2.3 直流超導量子干涉元件 (dc SQUIDs) . . . . .	9	第三章 實驗儀器與實驗方法 3.1 光學微影與蝕刻 . . . . .	15
15 3.1.1 光學微影步驟 . . . . .	16	3.1.2 光阻 . . . . .	19
蝕刻系統 . . . . .	20	3.1.3 高真空離子蝕刻系統 . . . . .	20
. . . . .	23	3.2 階梯式鈦酸鋇基板製作 . . . . .	22
. . . . .	23	3.2.1 基板的選取 . . . . .	22
. . . . .	23	3.2.2 鈦酸鋇基板的光學微影 . . . . .	23
. . . . .	23	3.2.3 鈦酸鋇基板的蝕刻 . . . . .	23
25 3.3 鈾銀銅氧薄膜成長 . . . . .	27	3.3.1 射頻磁控濺鍍 (RF Magnetron Sputtering) . . . . .	27
射沉積法 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 28 3.4 基板表面與薄膜結構分析 . . . . .	28	3.3.2 脈衝雷射沉積法 (Pulsed Laser Deposition, PLD) 28 3.4 基板表面與薄膜結構分析 . . . . .	28
. . . . .	28	3.4.1 原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) . . . . .	28
. . . . .	28	3.4.2 X射線薄膜結構分析 . . . . .	29
33 3.5 高溫超導量子干涉元件的特性測量 . . . . .	30	3.5 高溫超導量子干涉元件的製作與特性測量 . . . . .	30
. . . . .	30	3.5.1 高溫超導約瑟夫森接面的製作方法 . . . . .	30
. . . . .	33	3.5.2 階梯式基板約瑟夫森接面製作 . . . . .	33
. . . . .	38	3.5.3 高溫超導量子干涉元件的特性測量 . . . . .	35
38 4.1 階梯式鈦酸鋇基板製作與表面分析 . . . . .	38	第四章 高溫超導量子干涉元件的製作與結果 4.1 階梯式鈦酸鋇基板製作與表面分析 . . . . .	38
. . . . .	40	4.1.1 類鑽碳薄膜的磊晶成長 . . . . .	38
. . . . .	40	4.1.2 高角度階梯的製作 . . . . .	38
. . . . .	43	4.2 鈾銀銅氧薄膜特性 . . . . .	43
. . . . .	43	4.2.1 使用磁控濺鍍法成長的鈾銀銅氧薄膜 . . . . .	43
. . . . .	47	4.2.2 鈾銀銅氧薄膜的光學微影與蝕刻結果 . . . . .	47
. . . . .	48	4.3 雙晶基板式約瑟夫森元件 . . . . .	48
. . . . .	48	4.3.1 使用磁控濺鍍法成長的鈾銀銅氧薄膜 . . . . .	48
. . . . .	49	4.3.2 使用脈衝雷射沉積法成長的鈾銀銅氧薄 . . . . .	49
. . . . .	52	4.3.3 鈾銀銅氧薄膜的光學微影與蝕刻結果 . . . . .	52
. . . . .	53	4.4 高溫超導量子干涉元件測量結果 . . . . .	52
. . . . .	53	4.4.1 採用階梯式鈦酸鋇基板，鍍膜方式為磁控濺鍍法 . . . . .	53
. . . . .	56	4.4.2 採用雙晶體鈦酸鋇基板，鍍膜方式為磁控濺鍍法 . . . . .	56
. . . . .	56	4.4.3 採用雙晶體鈦酸鋇基板，鍍膜方式為脈衝雷射沉積法 . . . . .	56
58 第五章 數據分析與討論 . . . . .	64	參考文獻 圖目錄 圖2.1、理想導體與超導體在外加磁場下冷卻的差異 . . . . .	6
. . . . .	6	圖2.2、超導體(S)/絕緣體(I)/超導體(S)，組成SIS幾何形狀的約瑟夫森接面 . . . . .	7
. . . . .	7	圖2.3、約瑟夫森接面的等效電路圖 . . . . .	9
. . . . .	10	圖2.4、直流超導量子干涉元件的示意圖 . . . . .	10
. . . . .	14	圖2.5、dc-SQUIDs 之 V-I 曲線與 V- 曲線之關係 . . . . .	14
. . . . .	16	圖3.1、光學微影製程流程圖 . . . . .	16
. . . . .	16	圖3.2、(a)接觸式 (b)近接式 (c)投影式之示	16

意圖 . . . . .	18	圖3.3、正負光阻微影流程圖 . . . . .	20	圖3.4、真空鍍膜系統與離子蝕刻系統實體圖 . . . . .	21
圖3.5、為本套系統 - 離子蝕刻、薄膜蒸鍍、濺鍍系統之示意圖 . . . . .	22	圖3.6、顯影後使用光學顯微鏡觀察所拍攝下的照片 . . . . .	24	圖3.7、(a)氬離子束蝕刻系統腔體的實際圖 (b)氬離子束蝕刻系統的示意圖 . . . . .	25
圖3.8、離子束入射方向的示意圖 . . . . .	26	圖3.9、階梯示意圖 . . . . .	27	圖3.10、為AFM原理的簡單示意圖 . . . . .	29
圖3.11、布拉格繞射示意圖 . . . . .	30	圖3.12、約瑟夫森接面的製作方式，虛線所圍之面積為超導薄膜(a)雙磊晶約瑟夫森接面(b)雙晶體基板約瑟夫森接面(c)傾斜型三明治約瑟夫森接面(d)垂直方向的三明治約瑟夫森接面(e)階梯式基板約瑟夫森接面 . . . . .	32	圖3.13、階梯式基板約瑟夫森接面的製作流程 . . . . .	35
圖3.14、低溫恆溫器示意圖 . . . . .	36	圖3.15、量測系統示意圖 . . . . .	37	圖4.1、第一階段流程圖 . . . . .	39
圖4.2、量測類鑽碳薄膜蝕刻速率的方法 . . . . .	39	圖4.3、利用lift off方式製作階梯 . . . . .	41	圖4.4、利用RIE方式製作階梯 . . . . .	42
圖4.5、離子蝕刻的相對角度位置示意圖 . . . . .	44	圖4.6、雙離軸式(off-axis)磁控濺鍍示意圖 . . . . .	45	圖4.7、鈇銀銅氧薄膜的X射線繞射圖 . . . . .	45
圖4.8、鈇銀銅氧薄膜的溫度對電阻圖 . . . . .	46	圖4.9、鈇銀銅氧薄膜表面平整度圖 . . . . .	46	圖4.10、SQUID光罩的顯微鏡圖 . . . . .	49
圖4.11、雷射鍍膜系統內部的俯視圖 . . . . .	50	圖4.12、雷射鍍膜系統內部的側視圖 . . . . .	50	圖4.13、為雷射鍍膜系統的配置圖 . . . . .	51
圖4.14、SQUID的約瑟夫森接面附近顯微鏡放大圖 . . . . .	53	圖4.15、SQUID製作完成的顯微鏡圖 . . . . .	54	圖4.16、量測R-T後SQUID微橋燒斷掉的顯微鏡圖 . . . . .	55
圖4.17、SQUID在78 K的電流-電壓曲線 . . . . .	56	圖4.18、SQUID的電阻對溫度(R-T)的關係圖 . . . . .	57	圖4.19、SQUID在78 K的電流-電壓曲線 . . . . .	68
圖4.20、SQUID的電阻對溫度(R-T)的關係圖 . . . . .	59	圖4.21、SQUID在78 K的電流-電壓曲線與RSJ模型 $V = R_n(I - I_c)^2$ 的比較，式中 $R_n = 12.1$ ， $I_c = 8 \mu A$ . . . . .	60	圖4.22、(a)SQUID在77 K時之V-B曲線， $V_{pp} = 30V$ (b為數位相機所拍的V-B曲線) . . . . .	61
圖4.23、SQUID在77 K時，磁屏蔽屋下(沒加裝超導罐)的雜訊圖 . . . . .	62	圖4.24 (a)雙晶體鈇酸鋁基板，脈衝雷射沉積法。(b)雙晶體鈇酸鋁基板，磁控濺鍍法。(c)階梯式鈇酸鋁基板，磁控濺鍍法的掃描式電子顯微鏡圖 . . . . .	63	表目錄表 3.1、鈇銀銅氧和常用基板之參數 . . . . .	23
表4.1、鈇銀銅氧薄膜成長參數 . . . . .	44	表4.2、鈇銀銅氧薄膜成長參數 . . . . .	49	表4.3、鈇銀銅氧薄膜成長參數 . . . . .	51

## REFERENCES

[1] B. D. Josephson, " Possible New Effects in Superconductive Tunnelling ", Phys. Lett., 1, 251 ( 1962 ) .

[2] J. G. Bednorz, and K. A. Muller, " Possible High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System ", Z. Phys. B64, 189 ( 1986 ) .

[3] M. K. Mu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Hucng, Y. Q. Wang, and C. W. Chu, " Superconductivity at 93K in a new Mixed-Phase Y-Ba-C0u-O Compound System at Ambient Pressure ", Phys. Rev. Lett., 58, 908 ( 1987 ) .

[4] H.J.M. ter Brake, A.P. Rijpma, J.G. Stistra, J. Borgmann, H.J. Holland, H.J.G. Krooshoop, M.J. Peters, J. Flokstra, H.W.P. Quartero, H. Rogalla, Physica C 368, p.10-17 (2002).

[5] H.-J Krause, M.v. Kreutzbruck, Physica C 368, 70-79 (2002).

[6] J.R. Kirley, Physica C 368, p.55-65 (2002).

[7] J. B. Lee, D. L. Dart, R.J. Turner. M. A. Downey, A. Maddever, G. Panjkovic, C. P. Foley, K.E. Leslie, R. Binks, C. Lewis, and W. Murray, " Airborne, TEM survey with a SQUID magnetometer sensor ", Geophys. 67, P.468-477 (2002).

[8] See for instance, Proceeding of the Nato Advanced Study Institute on SQUID sensors: Fundamentals, Fabrication, and Applications; (Kluwer, Dordrecht, 1996), p.55.

[9] Antonio Barone, Gianfranco Paterno, Physics and Applications of the Josephson Effect, John Wiley & Sons, Canada, (1982).

[10] Konstantin K. Likharev, Dynamics of Josephson Junction and Circuits, Gordon and Breach Science Publishers, New York, (1986).

[11] Shu-Ang Zhou, Electrodynamics of solids and microwave superconductivity, John Wiley & Sons, New York, (1999).

[12] T. Van Duzer, C. W. Turner, Principles of Superconductive Devices and Circuits, Elsevier, New York, (1981).

[13] J.C. Gallop, SQUIDS, the Josephson Effects and Superconducting Electronics, Adam Hilger, Bristol, (1991).

[14] B. D. Josephson, " Coupled Superconductors ", Rev. Mod. Phys. 36, 216 ( 1964 ) .

[15] B. D. Josephson, " Supercurrents Through Barriers ", Adv. Phys. 14, 419 ( 1965 ) .

[16] K. Char, M. S. Colclough, S. M. Garrison, N. Newman, and G. Zaharchuk, " Bi-epitaxial grain boundary junctions in YBa2Cu3O7 ", Appl. Phys. Lett. 59, 733 ( 1991 ) .

[17] K. Char, M. S. Colclough, L. P. Lee, and G. Zaharchuk, " Extension of bi- epitaxial Josephson junction process to various substrates ", Appl.

Phys. Lett., 59, 2177 ( 1991 ) .

[18] Yu. A. Boikov, A. L. Vasiliev, and T. Claeson, “ Biepitaxial Josephson junctions with high current density based on  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ - films on silicon sapphire ” , J. Appl. Phys. 77, 1654 ( 1995 ) .

[19] Kiejun Lee and Ienair Iguchi, “ Josephson effects in  $\text{YBaCuO}$  grain boundary junctions on (100) $\text{MgO}$  bicrystal substrates ” , Appl. Phys. Lett. 66, 769 ( 1995 ) .

[20] I. V. Borisenko, P. B. Mozhaev, G. A. Ovsyannikov, K. Y. Constantinian, E. A. Stepantsov, “ Superconducting current-phase relation in high- $T_c$  symmetrical bicrystal junction ” , Physica C 368, 328 ( 2002 ) .

[21] J. Yoshida, S. Inoue, T. Hashimoto, and T. Nagano, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 3366 ( 1999 ) .

[22] R. Dittmann, J.-K. Heinsohn, A. I. Braginski, and C. L. Jia, IEEE Trans. Appl. Supercond. 9, 3440 ( 1999 ) .

[23] Gensoh Matsubara, Katsumi Eikyu, Masayuki Miyazaki, Hiroshi Kimura, and Yoichi Okabe, “ Fabrication of  $\text{YBCO/PBCO/SrTiO}_3/\text{PBCO/YBCO}$  Layered Structure or Superconductor-Insulator-Superconductor Tunnel-Type Josephson Junction ” , Jpn. J. Appl. Phys. 32, L1324 ( 1993 ) .

[24] Toshiyuki Matsui, Takeshi Suzuki, Akihiko Ohi, Hiroshi Kimura, and Kazuo Mukae, “ Fabrication of Tunnel Junctions with  $\text{YBCO/Insulator/YBCO}$  Layered Structure Using (013)-Oriented Films as Base Layer ” , Jpn. J. Appl. Phys. 32, L1218 ( 1993 ) .

[25] L. C. Ku, H. M. Cho, J. H. Lu, S. Y. Wang, W. B. Jian, H. C. Yang, and H. E. Horng, “ Characteristics of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  step-edge Josephson junctions on  $\text{MgO}$  substrate ” , Physica C 229, 320 ( 1994 ) .

[26] 賴再興, “  $\text{YBCO/PBCO/YBCO}$  傾斜型約瑟芬接面的製作與特性量測 ” .國科會專題研究計劃成果報告 ( 2002 ) .

[27] J. Z. Sun, W. J. Gallagher, A. C. Callegari, V. Foglietti and R. H. Koch “ Improved process for high- $T_c$  superconducting step-edge junctions ” , Appl. Phys. Lett. 63, 1561(1993)

[28] S.Y. Yang, Chun-Hui Chen, J.T. Jeng, H.E.Horng and H.C. Yang, Inst. Phys. Conf. Seri. 167, 189

(1999); J.T. Jeng, Y.C. Liu, S.Y. Yang, H.E. Horng, J.R. Chiou, J.H. Chen, and H.C. Yang, Inst. Phys. Conf. Seri. 167, 265 (1999).

[29] Guus J. H. M. Rijnders, Gertjan Koster, Dave H. A. Blank, and Horst Rogalla, Appl. Phys. Lett. 70, 1888, (1997).

[30] Gertjan Koster, Guus J. H. M. Rijnders, Dave H. A. Blank, and Horst Rogalla, Appl. Phys. Lett. 74, 3729, (1999).

[31] Dave H. A. Blank, Gertjan Koster, Guus J. H. M. Rijnders, Eelco van Setten, Per Slycke, Horst Rogalla, J. Crystal Growth 211, 98, (2000).