

高溫超導量子干涉元件的製程與特性研究

張耿銘、陳昭翰、陳盛基

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

摘要

為了將來發展自製的超導量子干涉元件控制器，必須製造優良的超導量子干涉元件進行測試。所以本研究主要在探討高溫超導量子干涉元件的製程，及建立所需的技術與能力。論文中研究兩種不同方式來形成約瑟夫森界面：1. 利用類鑽石薄膜製做階梯式單晶鈦酸鋇基板。2. 雙晶鈦酸鋇基板。採用磁控濺鍍法和脈衝雷射沉積法兩種不同方式成長的單層鈹銀銅氧薄膜來製作高溫超導量子干涉元件。從實驗結果發現，僅有採用雙晶體鈦酸鋇基板，使用脈衝雷射沉積法成長鈹銀銅氧薄膜做成的高溫超導量子干涉元件是成功的。從電阻對溫度的關係與掃描式電子顯微鏡的影像分析，可以確認使用階梯式單晶鈦酸鋇基板製作的高溫超導量子干涉元件都失敗的主要原因是來自於階梯式基板。因為製作出來的階梯式鈦酸鋇基板階梯處非常粗糙不平整，導致成長薄膜品質不佳。至於使用磁控濺鍍方法成長鈹銀銅氧薄膜在雙晶鈦酸鋇基板上，製作的高溫超導量子干涉元件亦失敗，仍無明確證據可瞭解失敗的原因，仍需繼續分析研究。

關鍵詞：超導量子干涉元件、類鑽石薄膜、磁控濺鍍

目錄

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	1.1.2 高溫超導量子干涉元件之應用	1
.	2	2.1.3 研究目的	2
.	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 約瑟夫森界面 (Josephson junctions)	6	2.2.1 直流約瑟夫森效應	6
.	6	2.2.2 約瑟夫森界面的等效電路模型	8
9 2.3 直流超導量子干涉元件 (dc SQUIDs)	9	3 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	15	3.1.2 光阻	19
.	20	3.1.3 高真空離子蝕刻系統	19
.	20	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	25
25 3.3 鈹銀銅氧薄膜成長	27	3.3.1 射頻磁控濺鍍 (RF Magnetron Sputtering)	27
.	27	3.3.2 脈衝雷射沉積法 (Pulsed Laser Deposition, PLD)	28
28 3.4 基板表面與薄膜結構分析	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
30 3.5 高溫超導量子干涉元件的製作與特性測量	30	3.5.1 高溫超導約瑟夫森界面的製作方法	30
.	30	3.5.2 階梯式基板約瑟夫森界面製作	33
33 3.5.3 高溫超導量子干涉元件的特性測量	35	4 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
.	38	4.1.1 類鑽石薄膜的磊晶成長	38
.	40	4.1.2 高角度階梯的製作	40
.	43	4.2 鈹銀銅氧薄膜特性	43
.	43	4.2.1 使用磁控濺鍍法成長的鈹銀銅氧薄膜	43
.	47	4.2.2 鈹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鈹銀銅氧薄膜	48
.	49	4.3.2 使用脈衝雷射沉積法成長的鈹銀銅氧薄	49
.	52	4.3.3 鈹銀銅氧薄膜的光學微影與蝕刻結果	52
.	52	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
.	58	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	58
64 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界面	7
.	7	圖2.3、約瑟夫森界面的等效電路圖	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
.	18	圖3.2、(a)接觸式 (b)近接式 (c)投影式之示意圖	18
.	20	圖3.3、正負光阻微影流程圖	20
.	21	圖3.4、真空鍍膜系統與離子蝕刻系統實體圖	21
.	22	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
.	22	圖3.6、顯影後使用	22

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
方式, 虛線所圍之面積為超導薄膜(a)雙磊晶約瑟夫森界面(b)雙晶體基板約瑟夫森界面(c)傾斜型三明治約瑟夫森界面(d)垂直方向的三明治約瑟夫森界面(e)階梯式基板約瑟夫森界面	32	圖3.12、約瑟夫森界面的製作方式, 虛線所圍之面積為超導薄膜(a)雙磊晶約瑟夫森界面(b)雙晶體基板約瑟夫森界面(c)傾斜型三明治約瑟夫森界面(d)垂直方向的三明治約瑟夫森界面(e)階梯式基板約瑟夫森界面	32
圖3.13、階梯式基板約瑟夫森界面的製作流程	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
.	41	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
示意圖	44	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
.	50	圖4.12、雷射鍍膜系統內部的側視圖	50
.	50	圖4.13、為雷射鍍膜系統的配置圖	51
面附近顯微鏡放大圖	53	圖4.14、SQUID的約瑟夫森界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
.	68	圖4.19、SQUID在78 K的電流-電壓曲線	68
.	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 $V = R_n(I_2 - I_c^2)^{1/2}$ 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)雙晶體鈇酸鋇基板, 脈衝雷射沉積法。(b)雙晶體鈇酸鋇基板, 磁控濺鍍法。(c)階梯式鈇酸鋇基板, 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
.	49	表4.2、鈇銀銅氧薄膜成長參數	49
.	49	表4.3、鈇銀銅氧薄膜成長參數	51

參考文獻

- [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-Cu-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 YBa2Cu3O7- films on

silicon sapphire ” , J. Appl. Phys. 77, 1654 (1995) .

[19] Kiejun Lee and Ienair Iguchi, “ Josephson effects in YBaCuO grain boundary junctions on (100)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 YBCO/PBCO/SrTiO₃/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 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 YBa₂Cu₃O_x tep-edge Josephson junctions on MgO substrate ” , Physica C 229, 320 (1994) .

[26] 賴再興, “ 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).