

拉普拉司深層能階暫態頻譜量測砷化鎵與砷化鋁鎵

Laplace Deep Level Transient Spectroscopy Measurements On GaAs And AlGaAs

學生：王子嵩

指導教授：李威儀 博士

國立交通大學電子物理研究所

中文摘要

在量測半導體材料特性時，深層能階暫態頻譜 (DLTS) 是個非常重要的量測工具。但是傳統的深層能階暫態頻譜無法有效解析出多個指數型電容暫態曲線的狀況。故我們利用拉普拉司轉換方程分析樣品的熱激發速率，將可以有效的提高傳統 DLTS 的解析度。

在本論文中，我們應用兩種不同的數值演算方法來解出代求的拉普拉司轉換方程式。其中一個叫做 Tikhonov regularization 方法，而另外一個方法為共軛梯度法。我們先將嘗試使用上述數值方法在已知時間常數的 RC 電路中，藉由模擬 RC 特性曲線找出已知的時間常數大小來證明該方法是可行的。接下來我們將應用於分析在砷化鋁鎵與砷化鎵中，會產生多個指數型電容暫態曲線的 DX 缺陷中心。

我們藉由傳統深層能階暫態頻譜量測以上樣品缺陷特性時，都將會獲得一個橫跨很多溫度的深層能階暫態頻譜圖。但是如果由分析熱激發速率出發的拉普拉司深層能階頻譜圖觀察，我們將更容易的分辨出這些相鄰的缺陷訊號。比如在砷化鋁鎵樣品量測中，我們以成功的分辨出相鄰只有 50meV DX 缺陷中心。最後由比較傳統深層能階暫態頻譜與拉普拉司深層能階頻譜結果，我們可以說利用拉普拉司深層能階頻譜是可以成功的提高傳統深層能階暫態頻譜的解析度。

Laplace Deep Level Transient Spectroscopy Measurements On GaAs And AlGaAs

student : Zi-Song Wang

Advisors : Dr.Wei-I Lee

Department (Institute) of Electrophysics
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Conventional Deep Level Transient Spectroscopy has been a valuable tool for the characterization of semiconductor materials. The resolution of the conventional DLTS is not high enough to decompose multiple exponential capacitances transient. We demonstrated that the resolution of DLTS can be improved by adopting the Laplace transform method.

In this study two numerical algorithms for inverting the Laplace transform have been employed : the Tikhonov regularization method, and the conjugate gradient method. The Laplace DLTS has been tested by measuring known exponential transients generated by RC circuits and applied to the study of multi-exponential capacitance transients resulting from defects in GaAs and $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$.

For these defects, conventional DLTS gives broad featureless lines, whereas Laplace DLTS reveals a fine structure in the emission spectra. By Laplace DLTS we found two DX centers in $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. After comparing Laplace DLTS with conventional DLTS, we proved that the resolution of DLTS can be improved.

誌 謝

兩年的時間很快就過去了，首先感謝李威儀老師提供這樣的環境與一路上不管是專業領域教導，還是樂觀豁達的待人處事態度都讓我受益良多。另外感謝李世昌學長與李奇霖學長每個禮拜幾乎都是一針見血的幫我解決大小問題，與不厭其煩的再三指導。尤其是李世昌學長，我想如果沒有學長您的幫忙，這本論文也不會有個合理的結果。還有要感謝鍾雲凱學長在碩一暑假時，給我們黃光製程的教導，我永遠記得點亮一顆自己做的藍光 LED 時那份喜悅與感動。當然也要感謝陳振芳老師，讓我可以使用電容有關的電性缺陷量測系統來完成我的論文實驗部分。而 MBE 薄膜量測實驗室的伙伴們劉立偉、林士傑與謝明芳，每個禮拜四下午排實驗時間，大概會是我碩士生活中最鮮明的記憶吧。尤其是劉立偉在共軛梯度法程式撰寫的幫忙，與林士傑、謝明芳在 DLTS 系統摸索期的討論都是我論文能完成很重要的推手。對於本實驗室的伙伴義宏與學弟怡麟，一個祝你在彩晶一帆風順一個祝你明年順利畢業。最後感謝在我求學過程中遇過的每一個人，與一直背後支持與栽培我的家人，很高興有你們的陪伴，讓我能完成碩士論文。也許現在碩士學歷快要只是基本配備了，但是如果沒有你們的扶持，我是不可能擁有現在的一切的。謝謝兩個字很簡單，但是這是我現在最想說的一句話。謝謝大家！最後僅以這篇論文獻給我的父母。

目 錄

中文摘要		I
英文摘要		II
誌謝		III
目錄		IV
表目錄		VI
圖目錄		VII
第一章、	緒論	1
第二章、	電容暫態頻譜響應	3
2.1	電容暫態產生之物理原因	3
2.2	電容暫態的數學表示式	5
2.3	Schockley – Read – Hall theory	7
第三章、	深層能階暫態頻譜系統理論與導納頻譜簡介	9
3.1	DLTS 優勢	9
3.2	DLTS 可獲得的參數與基本假設	9
3.3	DLTS 基本系統理論	10
3.4	DLTS 缺陷參數決定	11
3.5	深層能階空間分佈	14
3.6	DLTS 理論曲線	16
3.7	導納頻譜	17
第四章、	拉普拉司深層能階暫態頻譜	19
4.1	導論	19
4.2	求解未知函數 $F(s)$	21
第五章、	Ill – posed problem of Fredholm equation	23
5.1	何謂良態問題與病態問題	23
5.2	Fredholm equation of first and second kind	23
5.3	最小平方法	25
第六章、	Tikhonov regularization method	28
6.1	簡介 Tikhonov method	28
6.2	使用 Tikhonov method 來解決代求解的電容暫態方程式 (4.3)	32
6.3	未知數 α (regularization parameter) 與 $A_h(s,t)$ 矩陣	33
6.4	模擬已知方程的電容暫態曲線	39

第七章、	共軛梯度法 (conjugate gradient method)	49
7.1	導論	49
7.2	模擬已知方程的電容暫態曲線	50
7.3	比較 Tikhonov regularization method 與 Conjugate Gradient Method	51
第八章、	模擬 RC 電路	52
8.1	Tikhonov regularization method	53
8.2	Conjugate gradient method	57
8.3	比較 Tikhonov regularization method 與 conjugate gradient method	58
第九章、	電容暫態值 (Capacitance transient)	59
9.1	導論	59
9.2	量測暫態電容溫度	59
9.3	時間間隔 (τ) 與雜訊	60
9.4	非指數是分佈的電容暫態曲線	62
第十章、	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 塊材	64
10.1	基本電性量測	64
10.2	典型 DLTS 量測	67
10.3	導納頻譜量測	72
10.4	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 電容暫態頻譜曲線	73
10.5	Laplace DLTS	77
10.6	結論	92
第十一章、	GaAs 塊材	94
11.1	基本電性量測	94
11.2	典型 DLTS 量測	97
11.3	導納頻譜量測	103
11.4	GaAs 電容暫態頻譜曲線	104
11.5	Laplace DLTS	107
11.6	結論	122
第十二章、	總結與未來研究方向	123
12.1	總結	123
12.2	未來研究方向	124
12.3	Laplace DLTS 的優缺點	126
附錄 A		128



表 目 錄

表 (1.1)	使用 Laplace DLTS 量測三五族半導體的相關文獻	2
表 (6.1)	固定 n 為 0.2 下，上下調整 α 值	45
表 (6.2)	n 為 0.2 下，上下調整 α	47
表 (7.1)	比較 Tikhonov regularization method 與 conjugate gradient method	51
表 (7-2)	比較 Tikhonov regularization method 與 conjugate gradient method 誤差	51
表 (8.1)	固定 α 為 0.1 下，我們由 error1 的值來決定 s 的範圍	54
表 (8.2)	在固定 $s=0.075\text{sec}$ 下，改變一開始定義的 α 並且上下調整	54
表 (8.3)	比較 Tikhonov regularization method 與 Conjugate gradient method	58
表 (8.4)	比較 Tikhonov regularization method 與 Conjugate gradient method 誤差	58
表 (9.1)	EL2 center 與溫度相關的熱激發速率	59
表 (10.1)	改變偏壓的大小，記錄訊號峰值 C_p (pf)	70
表 (10.2)	缺陷濃度縱深分佈	71
表 (10.3)	由傳統 DLTS 結果反推的熱激發速率	74
表 (10.4)	Laplace DLTS 頻譜峰值與波形底下面積	79
表 (10.5)	Tikhonov regularization method 在不同偏壓範圍，不同溫度的模擬結果	85
表 (10.6)	Conjugate gradient method 的模擬結果	86
表 (10.7)	Laplace DLTS 與傳統 DLTS 結果	93
表 (11.1)	改變偏壓的大小，記錄訊號峰值 C_p (pf)	101
表 (11.2)	由典型 DLTS 量測結果反推 s (T)	104
表 (11.3)	圖 (11-18) 波形峰值與底下面積	109
表 (11.4)	Tikhonov regularization method 的模擬結果	113
表 (11.5)	Conjugate gradient method 迭代結果	114
表 (11.6)	Laplace DLTS 使用 Tikhonov regularization method 與 conjugate gradient method 所迭代出來的缺陷物理量	119

圖 目 錄

圖 (2-1)	一逆向偏壓(-Vr)施加於 p ⁺ n 二極體上.....	3
圖 (2-2)	一個電壓脈衝輸入，造成電子大量注入 trap center.....	3
圖 (2-3)	隨著電壓脈衝過去後，p ⁺ n 二極體又回到原先逆偏狀態.....	4
圖 (2-4)	缺陷因脈衝電壓捕獲的電子，會因熱激發而慢慢釋放出來...	4
圖 (2-5)	C(t)值由單一缺陷所提供	6
圖 (2-6)	C(t)值由多個缺陷所提供	6
圖 (2-7)	Y 軸取對數尺寸	7
圖 (2-8)	研究內容與方法	7
圖 (2-9)	缺陷有四種不同的復合過程	7
圖 (3-1)	DLTS 系統簡圖	10
圖 (3-2)	DLTS 訊號成因示意圖	11
圖 (3-3)	少數載子陷阱的電容暫態曲線	13
圖 (3-4)	蕭特基二極體能帶圖	14
圖 (3-5)	週期性逆向脈衝電壓	14
圖 (4-1)	傳統 DLTS 頻譜圖	20
圖 (4-2)	Laplace DLTS 頻譜圖	20
圖 (4-3)	Laplace DLTS 系統簡圖	21
圖 (6-1)	先猜測 A 矩陣中的 s 值為很大的範圍	38
圖 (6-2)	故我們決定 A 矩陣中 s 大小約為 6(1/sec)以下	38
圖 (6-3)	當 A 矩陣中的 s 範圍猜太小的結果	39
圖 (6-4)	方程式 (6.11) 做圖所得	40
圖 (6-5)	把圖 (6-4) Y 軸取對數得知	40
圖 (6-6)	n=100, α = 1, error1=9.036	41
圖 (6-7)	n=10, α = 1, error1=0.1416	42
圖 (6-8)	n=1.25, α = 1, error1=0.0128	42
圖 (6-9)	n=0.5, α = 1, error1=0.0115	43
圖 (6-10)	n=0.2, α = 1, error1=0.0110459	43
圖 (6-11)	虛線為方程式 (5-11), 而實線為 n=0.2, α = 1 下所得的模擬的 結果	44
圖 (6-12)	虛線為方程式, 而實線為 n=0.2, α = 1E-24 下所得的模擬的結 果	45
圖 (6-13)	n=0.2, α = 1E-24 下所得的模擬的待求矩陣 Z (s)	46
圖 (6-14)	當 n=0.2, α = 0.01 下的模擬結果	47
圖 (6-15)	虛線為方程式 (5-11), 而實線為 n=0.2, α = 0.01 下所得的模 擬的結果	48
圖 (6-16)	虛線為方程式 (6-11), 而實線為所得的模擬的結果方程式 (6-12)	48

圖 (7-1)	實線為模擬曲線，虛線為正確解	50
圖 (8-1)	使用 DAQ 卡擷取 RC 訊號的簡圖	52
圖 (8-2)	DAQ 卡擷取到的 RC 電路訊號	52
圖 (8-3)	把圖 (8-2) Y 軸的電壓值 $V(t)$ 取對數	53
圖 (8-4)	在 $\alpha=3$ 與 $s=0.075\text{sec}$ 下的模擬結果	55
圖 (8-5)	實線為模擬所得曲線，虛線為量測到的 RC 曲線	55
圖 (8-6)	虛線為量測到的 RC 曲線，而實線方程式： $V(t) = 0.5286e^{-5.55t}$	56
圖 (8-7)	實線為量測曲線，曲線為 conjugate gradient method 所獲得的 57 解	57
圖 (9-1)	$t_1 = 0.3\text{sec}$ ，擷取 400 個點	60
圖 (9-2)	縮短時間間隔為 t_2 ，擷取 400 個點	61
圖 (9-3)	再縮短時間間隔為 t_3 ，擷取 400 個點	61
圖 (9-4)	高陷阱濃度下產生的非指數式分佈的電容暫態曲線	62
圖 (10-1)	AlGaAs Schottky diode structure	64
圖 (10-2)	AlGaAs I-V Diagram	65
圖 (10-3)	AlGaAs C-V Diagram	65
圖 (10-4)	AlGaAs 縱深分佈	66
圖 (10-5)	在高電壓區域的 IV 曲線受到串聯電組影響	66
圖 (10-6)	0v~-2v、填充偏壓時間為 3msec 之 DLTS 訊號圖	68
圖 (10-7)	-1.5v~-2v、填充時間為 3msec 之 DLTS 訊號圖	68
圖 (10-8)	AlGaAs 塊材的奧瑞尼思圖	69
圖 (10-9)	DLTS 在不同偏壓範圍的訊號	70
圖 (10-10)	缺陷濃度縱深分佈	71
圖 (10-11)	$\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 導納頻譜	72
圖 (10-12)	定溫 140k 下改變不同脈衝時間，量測電容暫態曲線	74
圖 (10-13)	定溫 140k 下，不同偏壓範圍的電容暫態曲線	75
圖 (10-14)	定溫 145k 下，不同偏壓範圍的電容暫態曲線	75
圖 (10-15)	偏壓範圍-1v~-1.5v 下，隨著溫度改變的電容暫態曲線	76
圖 (10-16)	定溫 145k、偏壓範圍為-1v~-1.5v 下的電容暫態曲線	77
圖 (10-17)	把圖 (10-16) Y 軸取對數尺寸	78
圖 (10-18)	Y 軸為 $Z[s]$ 、X 軸為 $\text{Log}[s]$ 的 Laplace DLTS 頻譜圖	79
圖 (10-19)	模擬結果與量測曲線比較	80
圖 (10-20)	近似寫出模擬方程與量測曲線比較	80
圖 (10-21)	實線為量測曲線，虛線為迭代結果反推模擬曲線	81
圖 (10-22)	固定溫度為 140k 但不同偏壓範圍的模擬結果	82
圖 (10-23)	偏壓範圍固定在 0.5v~-1v，溫度循序由 135k 到 155k 的模擬結 83 果	83
圖 (10-24)	共軛梯度迭代結果	84
圖 (10-25)	固定偏壓範圍下 (0V~-0.5V)，綜合 Tikhonov regularization 與 88 conjugate gradient method 與傳統 DLTS 結論，畫在同一張 Arrhenius plot	88
圖 (10-26)	TA1 與 CA1 的奧瑞尼思圖 (Arrhenius plot)	88

圖 (10-27)	TA2 與 CA2 的奧瑞尼思 (Arrhenius plot) 圖	89
圖 (10-28)	Laplace DLTS 使用 Tikhonov regularization method 的結果 (TA1、TA2) , 反推出速率視窗為 0.00215sec 的理論曲線	89
圖 (10-29)	TA1 與 TA2 反推的理論曲線與量測曲線被包在 DLTS 量測曲線中	90
圖 (10-30)	由 Conjugate gradient method 的結果 (CA1、CA2) 所反推的理論曲線, 比傳統 DLTS 結果反推的理論曲線更接近量測所得的訊號	90
圖 (10-31)	CA1 與 CA2 反推的理論曲線與量測曲線被包在 DLTS 量測曲線中	91
圖 (11-1)	GaAs Schottky diode structure	94
圖 (11-2)	GaAs I-V Diagram	95
圖 (11-3)	GaAs C-V Diagram	95
圖 (11-4)	GaAs 縱深分佈	96
圖 (11-5)	在高電壓區域的 IV 曲線受到串聯電組影響	96
圖 (11-6)	GaAs 塊材傳統 DLTS 量測結果	97
圖 (11-7)	GaAs 塊材的奧瑞尼思 (Arrhenius plot) 圖	98
圖 (11-8)	當缺陷的電子填充率很低時, 它對電子的捕捉就類似一般的點缺陷	99
圖 (11-9)	當缺陷的電子填充率越來越多時, 會在它周圍形成位能障, 使它的對電子的捕捉速率越來越慢	100
圖 (11-10)	DLTS 在不同偏壓範圍之訊號	102
圖 (11-11)	GaAs 塊材縱深分佈	102
圖 (11-12)	GaAs 塊材變溫導納頻譜	103
圖 (11-13)	GaAs 在 220k 下改變不同的脈衝偏壓之電容暫態訊號	105
圖 (11-14)	電容暫態曲線隨溫度變化的關係圖	105
圖 (11-15)	電容暫態曲線隨溫度變化的關係圖	106
圖 (11-16)	定溫 210K、偏壓範圍為-0V -3V 下的 GaAs 電容暫態曲線	107
圖 (11-17)	把圖 (11-16) 對 Y 軸取對數座標	108
圖 (11-18)	Y 軸為 Z[s]、X 軸為 Log (s) 的 Laplace DLTS 頻譜圖	109
圖 (11-19)	虛線為量測曲線, 實線為模擬結果回推之曲線	110
圖 (11-20)	虛線為量測曲線, 實線為模擬曲線方程式 (11.3)	110
圖 (11-21)	實線為量測訊號, 虛線為迭代結果反推之理論曲線	111
圖 (11-22)	偏壓範圍固定在 0v ~ -3v, 溫度循序由 250k 到 290k 之 Tikhonov regularization method 的模擬結果	115
圖 (11-23)	Conjugate gradient method 結果	116
圖 (11-24)	綜合 Tikhonov regularization 與 conjugate gradient method 與傳統 DLTS 結論, 畫在同一張 Arrhenius plot 上	118
圖 (11-25)	虛線為典型 DLTS 所反推在速率視窗為 0.43sec 的理論曲線。很明顯的跟實線的 DLTS 量測訊號有一段偏差	119
圖 (11-26)	TS1 與 TS2 理論曲線被包在 DLTS 量測訊號中	120

- 圖 (11-27) 把 TS1 理論曲線疊加上 TS2 理論曲線, 與 DLTS 量測訊號相比 120
較
- 圖 (11-28) CS2 理論曲線被包在 DLTS 量測訊號中, 而 CS1 理論曲線沒有 121
- 圖 (11-29) 疊加 CS1 與 CS2 理論曲線, 並且與 DLTS 量測訊號比較之 121

