

短脈衝雷射激發兆赫輻射技術及其應用

¹洪勝富 ²齊正中

¹國立清華大學電機系 ²物理系

e-mail: sfhorng@ee.nthu.edu.tw

摘要

在本文中我們簡介短脈衝雷射激發兆赫輻射技術之發展背景、原理、實驗設置、與應用等。短脈衝雷射激發兆赫波技術由於其簡便的產生方法，靈敏的鎖相偵測技術，並提供皮秒極時間解析度，因此可望在短暫的未來有相當大的應用。

1. 兆赫波研究簡介

所謂兆赫(terahertz)波段，所指的是頻率在 10^{12} Hz 附近的電磁頻譜，它包含了由部分毫米波段(~ 0.1 THz)到遠紅外區(~ 25 THz)的一段電磁頻譜。在凝態物理的研究中，兆赫波段是一個非常重要的頻譜；因為在兆赫波段中，包含了許多決定材料特性的重要能階，如半導體中受體(acceptor)、施體(donor)及光激子(exciton)等之束縛能，光模聲子(optical phonon)、超導能隙，磁場作用下 Landau 能譜等，也都落在這一波段中。在科學發展史上，Tinkham 等人使用 FTIR 技術分析超導體在遠紅外波段的導電率，是直接證實 BCS 理論的最重要實驗證據之一^[1-4]，足見此一波段在科學上之重要性。其他如電子-聲子散射，各種穿隧機制，在能量或時間尺度上，大都與兆赫波區域重疊。又由於兆赫波段中包含了大多數分子的轉動或振動能階，因此在無線電天文、遙測、醫

學影像上之用途，也是十分具有前景。而隨著高速資訊時代之來臨，元件操作頻率的增加，也使得元件在兆赫波段的研究益形重要。

雖然兆赫波段具有如此重大的科學意義，但在此波段的研究，卻未如預期般的熱切開展。這最主要的問題就是，在兆赫波段欠缺良好而經濟的波源及相關的元件。以波源而言，所謂良好，亦即能涵蓋所需頻譜、具有足夠功率、與足夠的可調性(tunability)與穩定性(stability)。在電磁頻譜靠近紅外光的一邊，如一般傅氏轉換紅外線(FTIR)光譜技術中所常用的，為 1600K 至 2000K 之黑體輻射源，此類的輻射源可提供由近紅外至遠紅外邊的足夠信號強度，惟信號的相干性(coherence)則不甚理想，且通常難以涵蓋 1.2THz (40cm^{-1})以下至毫米波段的頻譜。在電磁頻譜靠近微波之另一邊亦存有可靠的半導體及行波管等微波及毫米波波源，但介於此兩者之間的次毫米波段，則欠缺連續可調之振盪器。外插混頻(heterodyne)常用的

diode multiplier, 如 RPG Radiometer-Physics^[5] 所產 1THz 波源, 是以 Gunn 振盪器九次倍頻而得, 為一定頻輸出, 頻寬與可調性十分有限。傳統上能包含兆赫頻譜之波源, 首推自由電子雷射 (free-electron laser)。但自由電子雷射雖具有高頻寬與高功率之優點, 卻十分昂貴且難以維護, 因此在普及性上十分欠缺。而以上這些方法皆無法用作高時間解析 (即時間解析在 ps 以下, 此為一般凝態系統中散射或穿隧機制之典型時間尺度) 時域量測的波源。因此兆赫波段動態時域量測, 一直需等到兆赫輻射現象之發現後, 才有長足的進步。

2. 短脈衝雷射激發兆赫波之發展歷史

八零年代後, 由於超快雷射技術的進步, 短脈衝雷射波源之取得更形方便, 而電子、光電元件與通信科技的進步, 元件分析的所需頻寬已超出全電子式微波分析技術之頻譜範圍, 如HBT、HEMT及RTD等元件之截止與最大頻率 (f_T 、 f_{max}) 皆常可達一百GHz以上; 因此利用光致電導閥 (photoconductive switch) 產生超短電脈衝以分析元件等之瞬時反應, 逐漸成為重要的研究課題。然而, 由光致電導閥所產生的電脈衝, 必須由產生處經波導傳播至待測樣品處, 因此當頻寬與傳播距離增大時, 類似於一般電磁能量之情形, 經由空間電磁波傳播, 即成為另一有用的選擇。八零年初, Mourou 及 Auston 等研究群首先嘗試將光致電導閥所產生的電脈衝以偶極天線輻射出, 並使用另一偶極天線來接收^[6-9], 此開啓了兆赫輻射波研究之重要課題。後續之研究包含了各種天線之研製^[6-16], 其中尤以Grischkowsky所發明之偶極天線尤為重要^[13]。其後, Auston 等研究群其後更發現, 將超短脈衝雷射照射於不同的元

件結構, 如p-i-n二極體^[17], delta-doped GaAs^[18], 非對稱耦合量子井^[19], 甚至從未加偏壓之半導體表面^[20]亦可產生頻率在兆赫波段的電磁輻射, 此即所謂兆赫輻射現象。以此方式產生之兆赫波, 不但遠較傳統之兆赫波源, 如自由電子雷射來得簡便, 更具有時間解析度在ps以下的優點, 同時, 由此法由於產生之脈衝波與激發之雷射光脈衝同步 (synchronized), 因此可應用鎖相(phase-lock)技術來增加量測的靈敏度。其他技術上的突破如1996年Resselaer Polytechnic Institute 物理系張希成 (X. C. Zhang) 教授的研究群開發出以(110) ZnTe 來偵測兆赫波之自由空間電光取樣 (free-space electro-optic sampling, FS-EOS) 技術^[21], 更將量測之訊號雜訊比提高到10000以上, 並達到極大的偵測強度範圍 (dynamical range)^[21-24]。1998年底該研究群更開發出單脈衝影像取樣(monopulse imaging)技術, 利用單脈衝電光量測技術對非重複性現象作影像取樣, 在筆者所知範圍內此為目前唯一可達皮秒時間解析度的單脈衝量測技術。在兆赫波技術發展上另一重要發展是1998年日本Institute of Molecular Science 之 N. Sarukura^[25]等研究群所發展磁場下脈衝雷射激發高強度兆赫波源, 此將脈衝兆赫波源之強度提昇至近mW階段。這些發展對兆赫波技術之應用在未來數年中必將有深切的影響。

3. 兆赫輻射之機制

關於兆赫輻射現象的物理機制, Auston 等研究群所提出的物理解釋是所謂的電流瞬衝模型 (current surge model) 或 光 電 導 (photoconduction) 模型, 此乃光激載子受表面或

外加電場加速而產生輻射^[20]，亦即光電流改變所產生之偶極輻射，此與光電流對時間之一階微分成正比。假設半導體表面電場受光激載子遮蔽效應可略去，則光電流之大小由入射光所激發之光載子數量所決定，因此兆赫輻射波之大小與入射光強之一階微分成正比。但若電流瞬衝模型為兆赫輻射波之主因，則光之功用僅在於激發光激載子，且因半導體表面或 p-i-n 二極體內之電場方向與晶體方向無關，兆赫輻射波亦應與晶體方向無關。此與實驗所觀察到在 GaAs (100)及(111)面上兆赫輻射具有方向相關性^[26]之結果並不相符。更有甚者 1991 年 Auston 等更發現以低於能帶間隙之光入射於半導體亦可產生兆赫波，而此時並未有真實光激載子之產生^[27]。1992 年，由 S. L. Chuang 及 S. L. Luo 等提出之另一模型^[26]，即所謂的光整流 (optical rectification) 模型，此說中兆赫輻射之產生為入射超短光脈衝經由非線性極化係數耦合而合成出一近似直流 (其實為兆赫，但相對於光之頻率來說，頻率甚低) 之極化 (polarization)。此極化之一次微分即為一等效電流，因此兆赫輻射波之大小與等效電流之一次微分，即入射光強之兩次微分成正比。至於非線性極化係數的來源，可由晶體本身之三階極化係數張量 $\chi_{ijk}^{(2)}$ ，如 GaAs，或經由四階極化係數張量 $\chi_{ijkl}^{(3)}$ ，藉與表面電場來耦合。此說不但可解釋前述晶體方向性之效應，亦可推廣至低維結構如耦合量子井等^[28]。

4. 短脈衝雷射激發兆赫輻射的實驗設置

圖一與圖二所示是我們實驗室中用來量測兆赫

輻射強度的實驗設置，兩種設置中所用的兆赫發射器皆為製作於半絕緣砷化鎵或低溫成長砷化鎵之光導天線，天線型式有大面積光導天線或 Grischkowsky 型式之光導偶極天線^[13]或螺旋天線等，兩種設置不同者在於其兆赫偵測器。在圖一的量測設置中是以光導天線來量測兆赫波之強度。所用天線是製作於低溫成長砷化鎵或氧離子植入之矽/藍寶石樣品 (silicon on sapphire)，天線型式有 Grischkowsky 型式之光導偶極天線^[13]及螺旋天線等。這些天線在兆赫波之偏壓下，由探測光束照射而產生光電流。因此由所量得光電流大小與時間延遲之關係可還原兆赫波之波形。圖二所示則是以電光偵測器來量測兆赫波。在我們的設置中所用的是 (110) 面的 ZnTe 晶體。此晶體之使用方式與一般橫向式電光偵測器相同，所不同者是偏壓由兆赫波提供。探測光與兆赫波之極化方向皆沿晶體之 [110] 方向，以同直線方向垂直入射電光晶體。兆赫波之存在轉動探測光之極化方向，因此通過極化分光器後再經差分方式偵測。四分之一波片之目的在於移動電光晶體之工作點以增加靈敏度。兩者各有其優缺點，比如電光晶體可配合二維影像之技術直接量測兆赫波之空間分佈，且其頻寬亦較天線來得寬。但光導天線對極化之敏感度、高靈敏度，較具方向性等。

5. 兆赫輻射技術之應用

在兆赫波之應用上，赫輻射波光譜技術已被廣泛的應用於半導體與超導體等材料在遠紅外頻譜性質的分析^[20,29-31]。其他如瞬時 Hall 效應^[32]、迴旋共振^[33]、超晶格中 Bloch 振盪^[34,35]、超導體在次毫米波 (遠紅外) 段導電率^[36-38]、量子井中 exciton 及重

電洞與輕電洞相關能階產生之節拍 (beating) 相關現象^[28,39-43]、兆赫波段光子晶體 (photonic crystal) 等之量測，亦已被深入的探索。

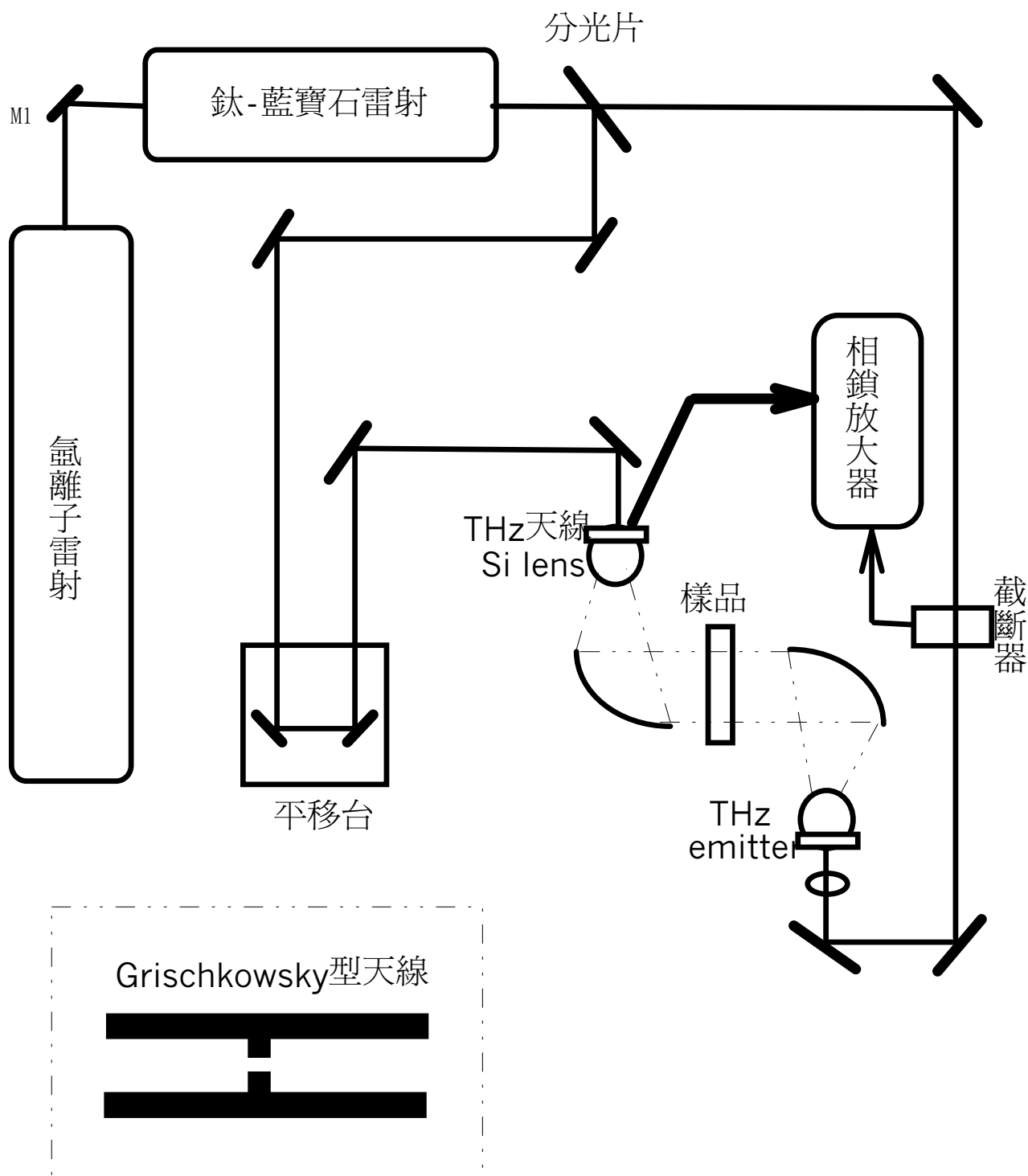
敝實驗室自1997年開始兆赫輻射現象的研究，除發展相關波源及量測技術外，主要是以兆赫輻射波來研究半導體與超導體之特性，這包括以兆赫輻射穿透光譜系統來研究高溫超導體YBCO之表面電導GaN，矽耐米微粒、與聚合物等之兆赫波穿透特性。此外，我們亦研究兆赫波段之二維光學晶體及導波結構、迴旋共振發射源、以及光混頻連續波兆赫波源之研究。除蔽研究群外，國內研究團隊尚有國立交通大學光電所等在短模衝雷射激發兆赫波方面亦頗有成績。其他兆赫波相關研究尚有中央研究院天文所無線電天文方面之工作、國立交通大學、台灣大學等以矽鍺應變層製作兆赫波雷射之研究等。隨著國內兆赫研究能量的建立，國內兆赫波相關研究必能有更傑出的結果。

參考資料：

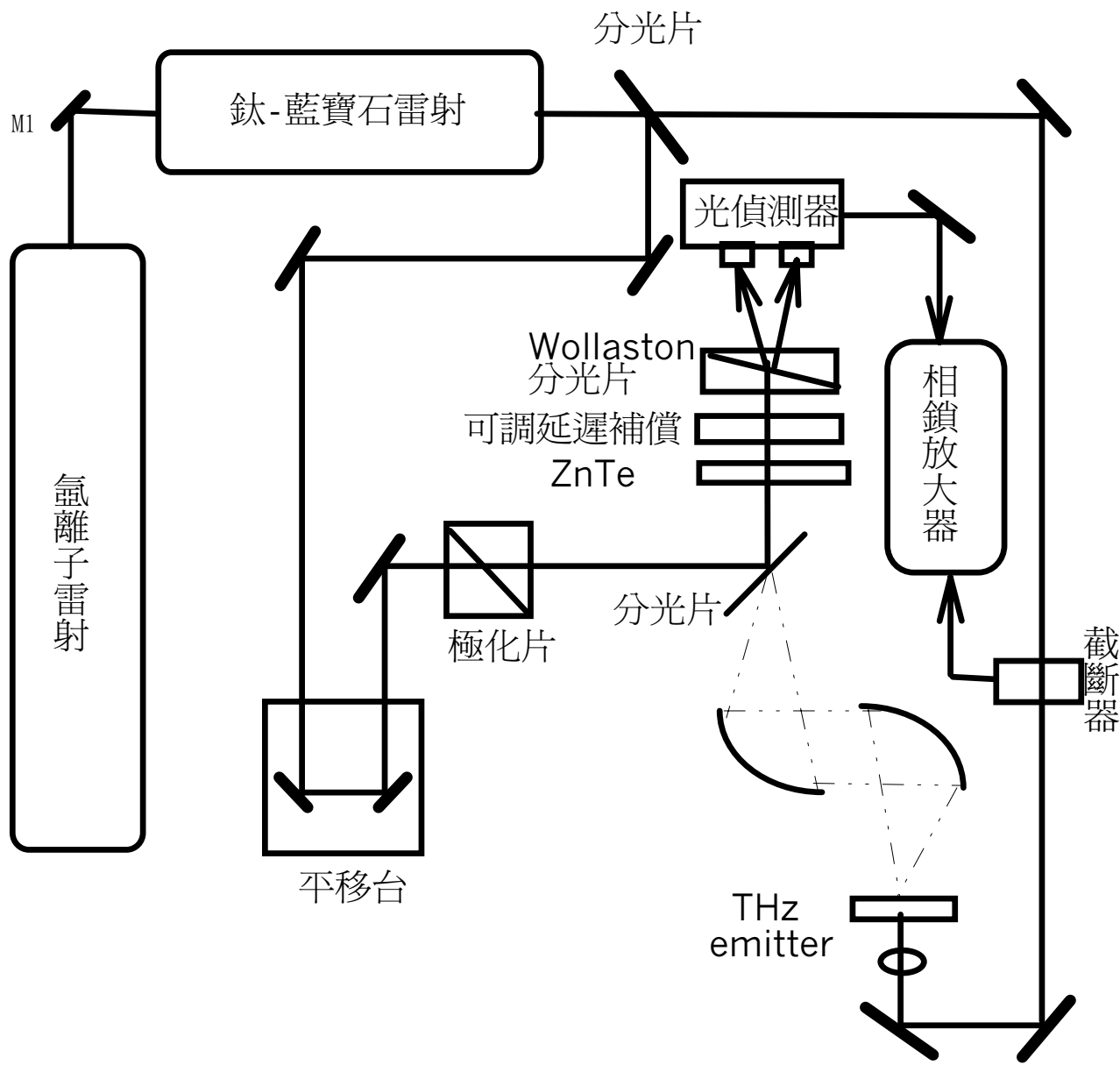
[1] R. E. Glover and M. Tinkham, Phys. Rev. 104, 844 (1956), Phys. Rev. 108, 243 (1957).
[2] D. M. Ginsberg and M. Tinkham, Phys. Rev. 118, 990 (1960).
[3] P. L. Richards and M. Tinkham, Phys. Rev. 119, 575, (1960).
[4] L. H. Palmer and M. Tinkham, Phys. Rev. 165, 588 (1968).
[5] RPG Radiometer-Physics, Bergerwiesenstr. 15, 53340 Meckenheim, Germany.
[6] G. Mourou, C. V. Stancampiano, and D. Blumenthal, Appl. Phys. Lett. 38, 470 (1981).

[7] G. Mourou, C. V. Stancampiano, A. Antonetti, and A. Orszag, Appl. Phys. Lett. 39, 295 (1981).
[8] R. Heidemann, T. Pfeffer, and D. Jager, Electron Lett. 19, 316 (1983).
[9] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, Appl. Phys. Lett. 45, 284 (1984).
[10] A. P. DeFonzo and C. R. Lutz, Appl. Phys. Lett. 51, 212 (1987).
[11] Y. Pastol, G. Arjavalingam, J. M. Halbout, and G. V. Kopsay, Elect. Lett. 24, 1318 (1980).
[12] P. R. Smith, D. H. Auston, and M. C. Nuss, IEEE. J. Quant. Elect. 24, 255 (1988).
[13] M. van Exter, C. Fattinger, and D. Grischkowsky, Appl. Phys. Lett. 55, 337 (1989).
[14] Y. Pastol, G. Arjavalingam, and J. M. Halbout, Elect. Lett. 26, 133 (1990).
[15] D. R. Dykar, B. I. Greene, J. F. Federici, A. F. J. Levi, L. N. Pfeffer, and R. F. Kopf, Appl. Phys. Lett. 59, 262 (1991).
[16] N. M. Froberg, B. B. Hu, X. C. Zhang, and D. H. Auston IEEE. J. Quant. Elect. 28, 2291 (1992).
[17] L. Xu, X. C. Zhang, D. H. Auston, Appl. Phys. Lett. 59, 3357 (1991).
[18] D. Birkedal, O. Hansen, C. B. Børensens, K. Jarasiunas, S. D. Brorson, and S. R. Keiding, Appl. Phys. Lett. 65, 79 (1994).
[19] H. G. Roskos, M. C. Nuss, J. Shah, K. Leo, D. A. Miller, A. M. Fox, S. Schmitt-Rink, and K. Köhler, Phys. Rev. Lett. 68, 2212 (1992).

- [20] X. C. Zhang, B. B. Hu, J. T. Darrow, and D. H. Auston, *Appl. Phys. Lett.* 56, 1011 (1990).
- [21] Q. Wu and X. C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* 67, 2523, 1995
- [22] Q. Wu and X. C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* 68, 1604, 1996
- [23] Q. Wu and X. C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* 68, 2924, 1996
- [24] Q. Wu, T. D. Hewitt, and X. C. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* 69, 1026, 1996
- [25] N. Sarukura, H. Ohtake, Z. Liu, T. Itatani, T. Sugaya, T. Nakagawa, and Y. Sugiyama, *Japn. J. Appl. Phys.* 37, L125, 1998.
- [26] S. L. Chuang, S. Schmitt-Rink, B. I. Greene, P. N. Saeta, and A. F. J. Levi, *Phys. Rev. Lett.* 68, 102 (1992).
- [27] B. B. Hu et al. *Phys. Rev. Lett.* 67, 2709, 1991
- [28] M. S. C. Luo, S. L. Chuang, P. C. M. Planken, I. Brener, H. G. Roskos, and M. C. Nuss, *IEEE J. Quant. Elect.* 6, 1478 (1994).
- [29] D. Grischkowsky, S. Keiding, M. van Exter, and C. Fattinger, *J. Opt. Soc. Am. B*, 7, 2007, 1990
- [30] B. I. Greene, P. N. Saeta, D. R. Dykaar, S. Schmitt-Rink, and S. L. Chuang, *IEEE J. Quantum Electron.* JQE-28, 2302, 1992
- [31] X. C. Zhang, J. T. Darrow, B. B. Hu, D. H. Auston, M. T. Schmidt, P. Tham and E. S. Yang, *Appl. Phys. Lett.* 56, 2228, 1990
- [32] X. C. Zhang, Y. Jin, T. D. Hewitt, T. Sangsiri, L. E. Kingsley, and M. Weiner, *Appl. Phys. Lett.*, 62, 2003, 1993
- [33] W. J. Walecki, D. Some, V. G. Kozlov, and S. V. Nurmikko, *Appl. Phys. Lett.*, 63, 1809, 1993
- [34] J. Feldmann et al. *Phys. Rev. B* 46, 7252, 1992
- [35] C. Waschke et al. *Phys. Rev. Lett.* 70, 3319, 1993
- [36] M. C. Nuss, K. W. Goosen, P. M. Mankiewich, M. L. O'Malley, and M. Bhushan, *J. Appl. Phys.* 70, 2238, 1991
- [37] M. C. Nuss, P. M. Mankiewich, M. L. O'Malley, E. H. Westerwich, and P. B. Littlewood, *Phys. Rev. Lett.* 66, 3305, 1991
- [38] M. C. Nuss, K. W. Goosen, P. M. Mankiewich, M. L. O'Malley, *Appl. Phys. Lett.* 58, 2561, 1991
- [39] H. G. Roskos, M. C. Nuss, J. Shah, K. Leo, D. A. B. Miller, A. M. Fox, S. Schmitt-Rink, and K. Kohler, *Phys. Rev. Lett.* 68, 2216, 1992
- [40] P. C. M. Planken, M. C. Nuss, I Brener, K.W. Goosen, M. S. C. Luo, S. L. Chuang, and L. Pfeiffer, *Phys. Rev. Lett.* 69, 3800, 1992
- [41] I. Brener, P. C. M. Planken, M. C. Nuss, L. Pfeiffer, D. E. Leaird, and A. M. Weiner, *Appl. Phys. Lett.* 63, 2213, 1993
- [42] P. C. M. Planken, I Brener, M. C. Nuss, M. S. C. Luo, S. L. Chuang, *Phys. Rev. B* 48, 4903, 1993.
- [43] M. S. C. Luo, S. L. Chuang, P. C. M. Planken, I Brener, M. C. Nuss, *Phys. Rev. B* 48, 11043, 1993.



圖一、以光導天線為偵測器之兆赫光譜量測設置



圖二、以電光偵測器為接收器之兆赫光譜量測設置