穿隧型異質接面矽晶太陽電池技術簡介

The Technology of Tunneling Heterojunction Silicon Solar Cell

蕭睿中 J. C. Hsiao[1]、林昭正 C. C. Lin[2]、葉峻銘 C. M. Yeh[2]、杜政勳 C. H. Du[3]
工研院綠能所(GEL/ITRI) [1]研究員、[2]資深研究員、[3]正研究員/經理

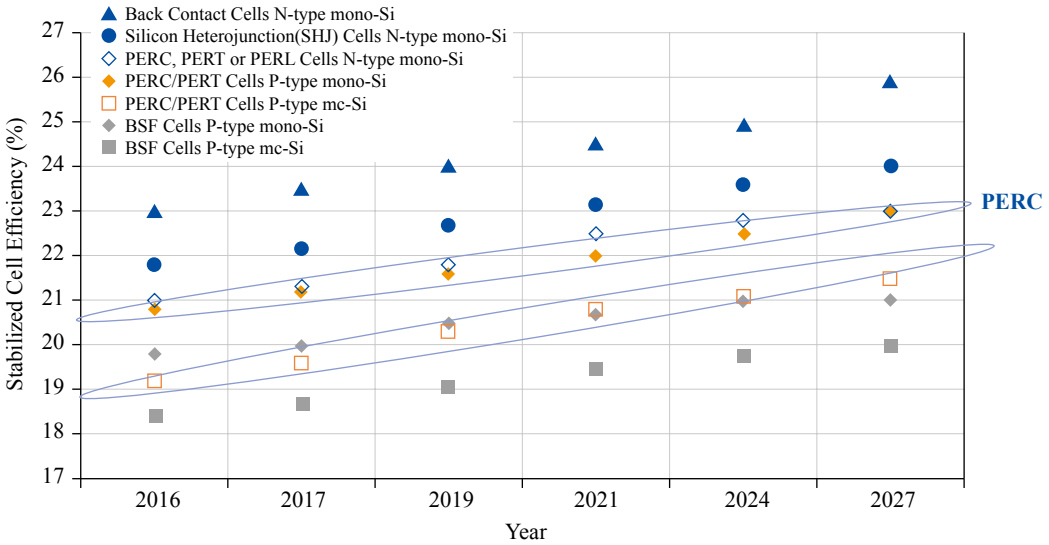
近年來由於全球暖化及環保意識不斷高漲，綠能產業蓬勃發展，太陽光電成為綠能產業的主流之一，高效率、低成本的太陽電池技術研發成為首要目標。穿隧式異質接面太陽電池為近來新型高效率太陽電池的焦點，它的結構簡單，為一鈍化接觸結構，還結合了異質接面太陽電池的優點，具有傑出的表面鈍化能力及載子選擇性，加上氧化矽層與多晶矽的搭配，具高溫穩定性，未來發展具有相當大的潛力。本文將著重於新型矽晶太陽電池—穿隧型異質接面太陽電池的技術發展進行介紹。

In recent years, the progress of the green energy industry has become more prosperous due to the growth of the issue of global warming and the environmental consciousness. Solar cell is the main stream of the green energy industry. The priority targets of technology research of the solar cell are high efficiency and low cost. The focus of novel high efficiency solar cell is the tunneling heterojunction solar cell. The simple structure of the tunneling heterojunction solar cell is a passivated contact. The structure combines the advantages of the heterojunction a-Si:H/c-Si structure, i.e. excellent surface passivation and carrier selectivity. And the structure with a tunneling oxide and a classical poly-crystalline silicon contact has higher temperature stability. In this paper, the technology developments of the tunneling heterojunction silicon solar cell will be introduced.

關鍵詞/Key Words
鈍化接觸(Passivated Contact)、多晶矽(Poly-crystalline Silicon)、穿隧氧化層(Tunneling Oxide)

前　言

目前矽晶太陽電池主要可分為兩大類：P型矽晶太陽電池與N型矽晶太陽電池。在P型矽晶太陽電池上，主要有標準背電場(Back Surface Field; BSF)結構太陽電池與近年逐漸成為高效電池主力的射極與背面鈍化(Passivated Emitter and Rear Cell; PERC)結構太陽電池。標準背電場結構在單晶矽晶片上的太陽電池其量產上可達到19~20%的光電轉換效率；在背面鈍化結構太陽電池上[(1)]，目前光電轉換效率可達到



資料來源：ITRPV (2017)

▲圖一　矽晶太陽電池效率發展趨勢

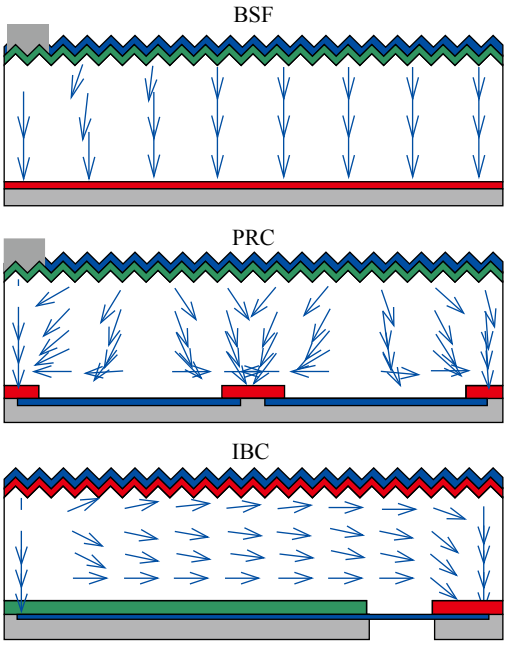
21%以上。而在N型矽晶太陽電池上主要有兩種，分別為異質接面太陽電池(Hetero-junction with Intrinsic Thin Layer; HIT)[2]以及交指式背接觸式太陽電池(Interdigitated Back Contact Solar Cells; IBC)[3]，此兩種N型矽晶太陽電池皆可達到23%以上的高光電轉換效率。各式矽晶太陽電池效率發展趨勢如圖一所示。由於N型矽晶電池具有較低的複合電流，因此目前世界最高轉換效率之太陽電池皆是以N型為主。

穿隧型異質接面太陽電池技術發展介紹

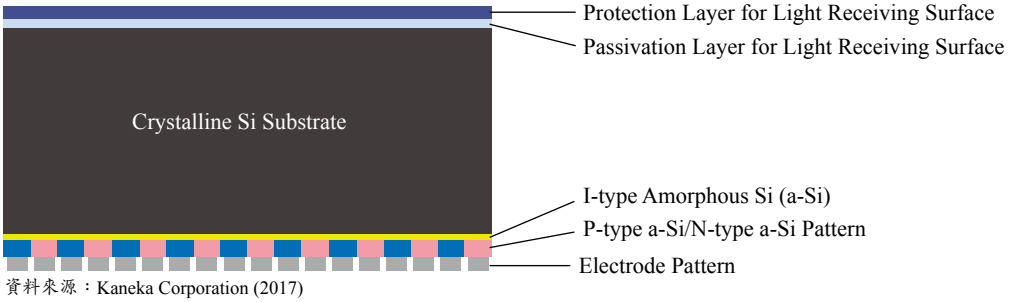
太陽電池的運作原理是吸收層吸收太陽光能之後產生自由的電子-電洞對，但自由的電子-電洞會很快地復合，必須在自由的電子-電洞復合之前將其利用內電場的方式分別收集至不同極性的電極，因此各個不同結構的太陽電池會有不同電流傳導的方式，如圖二所示，分別是BSF結構太陽電池、PRC(Partial Rear Contact)結構太陽電池以及IBC結構太陽電池。圖二中所顯示的箭頭方向代表電流的方向。在傳統BSF太陽電池結構中，背面使用鋁膠，經網印塗佈與高溫燒結後形成一背面電場層，這一背面電場層形成一背面全面積的接觸，由於背面全面積接觸的影響，其電流傳輸的方向為一單一縱向的傳輸。但在PRC結構太陽電池中，由於PRC結構電池背面是一背面鈍化層與點接觸的方式，其電流傳輸的方向包含縱向傳輸與橫向傳輸，且電流在橫向傳輸的距離上遠大於在縱向傳輸，因此點接觸的點間距會是影響整體光電轉換效率重要的因素。點接觸的金屬接觸點越多越密集，雖然串聯電阻會降低，填充因子會提高，但在開路電壓上會因此而降低。這是因為金屬在與矽界面的地方有非常大的電子能態密度，使得在金屬接觸的界面自由

電子-電洞的復合速度會非常大，因此在矽晶片表面的鈍化效果會大幅下降。

如何讓金屬接觸的界面上所造成的自由電子-電洞的復合最小化，這對於太陽電池的技術提升是一個非常重要的議題。下面兩種方式可以有效地減少金屬接觸所造成的復合問題：①減少金屬接觸的面積，並且只在部分有形成金屬接觸的地方來製作摻雜，如鈍化射極背面局部擴散太陽電池結構(Passivated Emitter with Rear Locally Diffused; PERL)[5]；②使用一個薄膜層的結構來隔開金屬與矽晶片的表面，且此一薄膜層對矽晶片表面必須要有很好的鈍化能力，另外這一薄膜層還可以作為太陽電池中一個具有良好導電性的接觸，我們稱此結構為一鈍化接觸(Passivated Contacts)的結構。我們熟知的高效率太陽電池中的異質接面太陽電池就是一個很好的鈍化接觸結構的電池，目前世界最高轉換效率的異質接面電池為Kaneka團隊所製作[6]，光電轉換效率為26.6%，電池結構如圖三所示。異質接面太陽電池是利用非晶矽薄膜(a-Si:H)作為一個鈍化接觸的薄膜層。非晶矽薄膜對矽晶片表面提供了非常好的鈍化效果，由於不同的能帶間隙材料的異質接合，異質接面矽晶太陽電池為單晶矽材料與寬能隙非晶矽薄膜材料的的接合，減少會造成自由載子復合的界面能位密度(Interface State Density)，達到很好的表面鈍化效果。再結合交指式背接觸式的結構，由於沒有了正面電極的光遮蔽，能夠有效的獲得在短路電流上的增益，以達到非常高的光電轉換效率[7]。

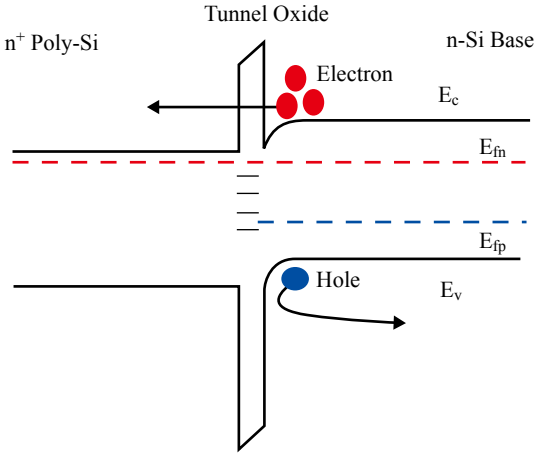


▲圖二　不同太陽電池結構的電流傳輸方式示意圖[4]

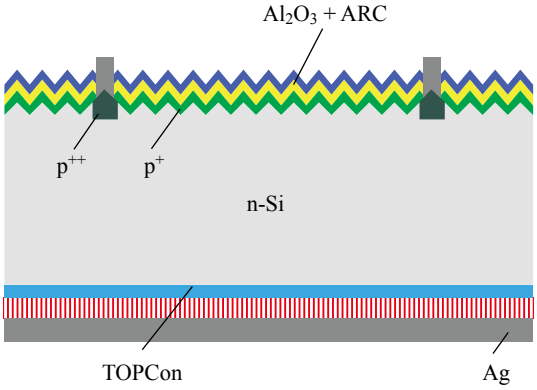


資料來源：Kaneka Corporation (2017)

▲圖三　異質接面太陽電池結構示意圖



▲圖四　穿隧型異質接面能帶結構示意圖[8]

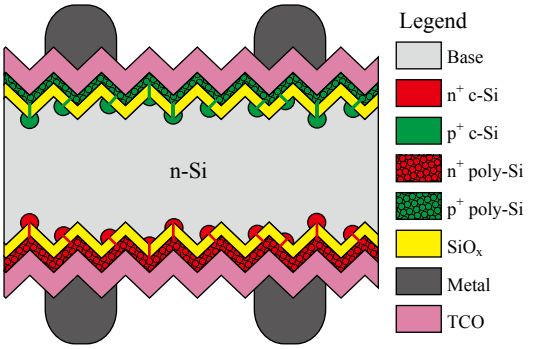


▲圖五　Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon)結構示意圖[4]

本篇文章所介紹的穿隧型異質接面太陽電池(Tunneling Heterojunction Solar Cell)就是一個鈍化接觸的結構，如圖四所示。這技術使用一非常薄的穿隧氧化層(Tunneling Oxide)與一重摻雜的多晶矽(Poly-crystalline Silicon)薄膜的堆疊結構作為鈍化接觸。穿隧型異質接面技術結合了非晶矽異質接面高能隙的優點，擁有傑出的載子選擇性，但由於非晶矽薄膜在製程上有溫度的侷限性，在高溫的環境下薄膜品質會劣化，因此穿隧型異質接面太陽電池在鈍化接觸上選擇了傳統的多晶矽薄膜作搭配，多晶矽薄膜相較於非晶矽薄膜在高溫環境下有著更良好的穩定性，並且在電性上比非晶矽薄膜與透明導電氧化層(TCO)薄膜的堆疊具有更低的接觸阻抗。因此在N型太陽電池中，全面積鈍化接觸的技術上穿隧型異質接面太陽電池具有很大的發展潛力。

在穿隧型異質接面太陽電池技術方面，近幾年來有不少國際研究單位紛紛投入研究開發，像是德國的Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems(ISE)[4,9]、Institute for Solar Energy Research Hamelin(ISFH)[10]以及美國的再生能源實驗室National Renewable Energy Laboratory(NREL)[11]等。Fraunhofer ISE研發單位近年來致力於穿隧型異質接面電池技術研究，其發展的電池結構如圖五所示。矽基板是使用阻值1 Ωcm的FZ N-type的晶片，在電池結構正面金字塔的部分是用硼擴散(Boron-diffused)的方式製作射極，阻值約為140 Ω/sq，之後在射極上沉積氧化鋁薄膜(Al_2O_3)作表面鈍化層以及氮化矽作為抗反射層。在電池結構背面使用氧化矽薄膜與摻雜矽薄膜的堆疊作鈍化接觸，他們稱這樣的結構為TOPCon(Tunnel Oxide Passivated Contact)。Fraunhofer ISE發展TOPCon結構的太陽電池光電轉換效率達25.1%，開路電壓為718 mV。

另一個研究單位ISFH在穿隧型異質接面太陽電池的研發上也有所投入，圖六為其發展的電池結構。這是一個雙面發電的太陽電池(Bifacial Solar Cell)結構，電池的正面與背面部分在矽晶片表面皆是使用氧化矽層與摻雜多晶矽薄膜層堆疊作為鈍化



▲圖六　Poly-Si on Passivating Interfacial Oxides (POLO)太陽電池結構示意圖[12]

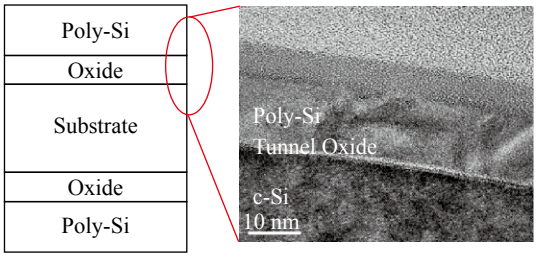
接觸，多晶矽薄膜層是使用低壓化學沉積系統(LP-CVD)沉積P型與N型的矽薄膜，之後再將沉積完的矽薄膜進行高溫退火(Annealing)，在高溫的環境下形成一PN接面，退火溫度約800~1,050度。接著在多晶矽薄膜上沉積透明導電氧化層(TCO)作為抗反射層與載子傳輸層，他們稱這樣的雙面對稱結構為Poly-Si on Passivating Interfacial Oxides(POLO)。從ISFH的研究結果顯示，這種POLO Junction結構的鈍化效果非常傑出，iV_{oc}(Imply V_{oc})為732 mV，整體的J_0值為12 fA/cm^2 [12]。

穿隧型異質接面太陽電池最主要的技術核心就是在氧化矽層與多晶矽薄膜層的掌握，從各研究單位的研究顯示氧化矽層的厚度掌握非常重要，若氧化矽層厚度太薄，則會使得表面鈍化的效果降低；但若氧化層厚度過厚，則會阻擋載子的傳輸。因此如何製作並控制適當厚度的氧化矽層(1~2 nm)是非常關鍵的。在半導體製程技術中，矽晶片表面製作氧化矽層有幾種不同的方式，主要可分作兩大類：①濕式氧化；②乾式氧化。在濕式氧化技術方面，成長氧化矽層的方式有下列幾種：①使用高壓高溫的水蒸氣氧化矽晶片表面；②將矽晶片浸泡在硝酸溶液中氧化矽晶片表面；③將矽晶片浸泡在含有臭氧的去離子水中氧化矽晶片表面。另外乾式氧化的技術，是使用高溫氧化爐管進行熱氧化(Thermal Oxidation)的方式製作。在高溫氧化爐管中利用高純度的氧氣，在高溫的製程環境下將矽晶片表面反應成二氧化矽(SiO_2)。以不同製程方法成長的氧化矽層以及分別在平面與金字塔的矽晶片上對於表面鈍化的影響，如表一所示，氧化矽層的厚度均控制在1.7 nm。從表一中顯示，三個不同製程方法的氧化矽層中，包括硝酸氧化、臭氧氧化以及熱氧化，其中以熱氧化的方式對表面鈍化的效果最好。另外在不同的晶片表面形貌以及多晶矽的摻雜型態對表面鈍化也有不同的影響，以N型多晶矽在平面的矽晶片上表面鈍化為最佳，而P型多晶矽在金字塔表面的矽晶片上的表面鈍化為最差。

近年來工研院綠能與環境研究所的矽晶實驗室團隊對於穿隧型異質接面太陽電池上的技術也有所著墨，致力於氧化矽的開發與均勻性的控制，摻雜型多晶矽結合氧化矽進行表面鈍化的技術發展，以及穿隧型異質接面太陽電池技術整合。摻雜型多晶矽結合氧化矽進行表面鈍化技術，結構如圖七所示，在拋光的矽晶片表面成長氧化矽與多晶矽薄膜，氧化物的厚度透過穿透式電子顯微鏡(Transmission Electron Microscopy; TEM)分析中觀察。圖七中顯示氧化矽的厚度控制在約1.5 nm，這樣的厚度有利於載子的穿隧。另外摻雜型多晶矽結合氧化矽層表面鈍化能力上面，少數載子生命週期(Lifetime)大於2 ms，顯示摻雜型

▼表一　多晶矽薄膜以不同製程方法成長的氧化矽層以及分別在平面與金字塔矽晶片上對表面鈍化的影響[12]

Surface	Poly-Si Doping Type	H Treatment	Chemical Oxide (~1.7 nm)		Ozone Oxide		Thermal Oxide (~1.7 nm)	
			J_0 (fA/cm^2)	iV_{oc} @1 sun (mv)	J_0 (fA/cm^2)	iV_{oc} @1 sun (mv)	J_0 (fA/cm^2)	iV_{oc} @1 sun (mv)
Planar	n^+	FGA	1.5	742	0.5	743	1.1	742
		SiN_x	0.6	747	0.6	748	0.8	749
Textured	n^+	FGA	29	693	13	715	11	727
		SiN_x	6	735	4.4	738	3.8	741
Planar	p^+	FGA	8	718	11	712	6	721
		SiN_x	5	729	5	727	3.8	734
Textured	p^+	FGA	71	669	112	661	54	681
		SiN_x	40	690	48	684	27	700



資料來源：工研院綠能所(2017)

▲圖七　摻雜型多晶矽薄膜結合氧化矽層結構

資料來源：工研院綠能所(2017)

▲圖八　穿隧型異質接面太陽電池製作流程圖

多晶矽結合氧化矽層有很好的表面鈍化能力，少數載子生命週期的量測是使用Sinton Instruments WCT-120。最後在元件整合技術上其製程流程如圖八所示，摻雜型多晶矽與氧化矽層作為鈍化接觸，並結合抗反射層與金屬電極完成穿隧型異質接面太陽電池，電池光電轉換效率為22.5%。

結　論

現今世界太陽電池市場仍是以矽晶太陽電池為主流，且矽晶太陽電池相關之設備與製程技術相對成熟，矽晶太陽電池在未來15年內應仍是未來市場的主流。穿隧式異質接面太陽電池為新型高效率太陽電池的焦點，它的結構簡單，結合了異質接面太陽電池的優點，擁有傑出的表面鈍化能力以及載子選擇性，與多晶矽薄膜的結合，具有對高溫的穩定性，且穿隧式異質接面太陽電池屬一鈍化接觸的結構，大幅減少了金屬與矽表面接觸所形成的載子復合現象，目前已有相關的業者紛紛投入，期待此技術在太陽電池產業的發展潛力。

誌　謝

本研究工作承蒙經濟部能源局資助，謹此致謝。

參考文獻

1. T. Dullweber, M. Siebert, B. Veith, C. Kranz, J. Schmidt, R. Brendel, B.F.P. Roos, T. Dippell, A. Schwabedissen, S. Peters, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2011).
2. Ayumu Yano, Satoshi Tohoda, Kenta Matsuyama, Yuya Nakamura, Takeshi Nishiwaki, Kazunori Fujita, Mikio Taguchi, and Eiji Maruyama, 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2012).
3. D. D. Smith, P. Cousins, S. Westerberg, R. De Jesus-Tabajonda, G. Aniero, and Y.-C. Shen, IEEE Journal of Photovoltaics 6, pp. 1465-1469 (2014).
4. S. W. Glunz, F. Feldmann, A. Richter, M. Bivour, C. Reichel, H. Steinkemper, J. Benick, M. Hermle, 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2015).
5. Jianhua Zhao, Aihua Wang, Pietro P. Altermatt, Stuart R. Wenham, Martin A. Green, ,Solar Energy Materials and Solar Cells, Volumes 41-42, June 1996, Pages 87-99.
6. New Energy and Industrial Technology Development Organization, Kaneka Corporation, World's Highest Conversion Efficiency of 26.33% Achieved in a Crystalline Silicon Solar Cell — A World First in a Practical Cell Size — , September 14, 2016
7. AJ. Nakamura, N. Asano, T. Hieda, C. Okamoto, H. Katayama, and K. Nakamura, IEEE Journal of Photovoltaics 4, pp. 1491-1495 (2014).
8. Yuguo Tao, Corresponding author, Vijaykumar Upadhyaya, Keenan Jones, Ajeet Rohatgi, AIMS Materials Science, 3(1): 180-189 (2016).
9. https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2017/new-world-record-efficiency-of-25-point-7-percent-for-both-sides-contacted-monocrystalline-silicon-solar-cell.html
10. R. Peibst, U. Römer, Y. Larionova, M. Rienäcker, A. Merkle, N. Folchert, S. Reiter, M. Turcu, B. Min, J. Krügener, D. Tetzlaff, E. Bugiel, T. Wietler, R. Brendel, Solar Energy Materials & Solar Cells 158, 60-67, 2016.
11. P. Stradins, S. Essig, W. Nemeth, B.G. Lee, D. Young, A. Norman, Y. Liu, J-W. Luo, E. Warren, A. Dameron, V. LaSalvia, and M. Page, 6th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion Kyoto, Japan November 23-27, 2014.
12. R. Peibst, Y. Larionova, S. Reiter1, M. Turcu, R. Brendel, D. Tetzlaff, J. rügener, T. Wietler, U. Höhne, J.-D. Kähler, H. Mehlich5, S. Frigge, 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2016).

太陽光電系統/電廠第三方檢測評估服務
Third-party Photovoltaic Systems Testing and Assessment Services
工研院綠能所 太陽光電技術組

☀ PV系統生命週期第三方認證服務
PV系統規劃、設計、施工階段之文件審查與評估
PV系統施工現場檢查與測試
PV系統現場竣工檢查與測試

☀ 已完工系統定期檢測評估服務
PV系統相關文件審查
PV系統現場檢查與測試

☀ 系統檢測服務實績
合計國內超過30MW、海外50MW之系統檢測服務實績
提供系統/電廠保險、驗收、買賣或定期性能確認參考

連絡窗口　詹麒璋　TEL：03-5915246 / E-mail:Arcadia@itri.org.tw