

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

砷化鎳高頻元件銅金屬化研究及可靠性評估

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-009-069-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學材料科學與工程學系

計畫主持人：張翼

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 6 日

## 一、計畫中文摘要

關鍵詞：砷化鎵，銅金屬化製程，高電子移動率電晶體，異質接面雙極電晶體，歐姆接觸，空氣橋，熱穩定性，可靠性。

摘要：

本研究旨將目前砷化鎵銅製程整合至砷化鎵高頻元件製程上，並以高電子移動率電晶體(HEMT)與異質接面雙極電晶體(HBT)研究其元件特性。內容包括前端製程之歐姆接觸金屬、內連接導線與空氣橋部分，並驗證其熱穩定性與可靠性評估。在完成元件製作後進行量測電特性及熱處理之特性變化之外，同時探討銅/擴散阻障層/基層材料間之材料界面反應情況，包括銅/擴散阻障層/歐姆金屬等之多層薄膜材料系統穩定性研究。本報告內容並完成將完全使用銅取代金的 HBT 製程，可以增加元件特性及降低成本，並可將此製程應用於高頻砷化鎵 MMIC 製程上。

## 二、計畫英文摘要

Keywords : GaAs, Copper metallization process, high electron mobility transistor, hetro-junction bipolar transistor, ohmic contact, air-bridge, thermal stability, reliability.

Abstract:

In this project, we have set up the copper metallization process for GaAs high electron mobility transistors(HEMT's) and (hetro-junction bipolar transistors)HBT's. The devices are with Cu-based ohmic contacts, interconnects and air-bridges. The electrical performance, thermal stability and reliability of the copper metallized devices were also evaluated in this project. The thermal stability and interface reactions of copper/diffusion-barrier and copper/diffusion-barrier/ohmic-metal were also studied. In this report, we have successfully demonstrated that Au-free, fully Cu metallized HBT can be achieved by using Pt as the diffusion barrier and Pd/Ge and Pt/Ti/Pt/Cu as the ohmic contacts. This study shows promising results for copper metallization of GaAs devices and MMIC for high frequency applications.

### (一) 前言：

銅金屬化製程在矽 IC 製程應用上是十分熱門的題目，國內各大矽 IC 廠亦卯足全力發展此方面之製程，目前已經將銅製程取代鋁應用在矽元件上[1-4]。在矽 IC 製程銅金屬化，具有下列優點：(1)電阻值  $1.7 \mu \Omega\text{-cm}$  遠較 Al 的  $2.74 \mu \Omega\text{-cm}$  為低，(2)對電子遷移效應和應力遷移效應抵抗性較佳，(3)成本較低。由於 Cu 會擴散至 Si 而成為 deep trap，這是其主要缺點，但先進的矽 IC 製程發展，使用如 Ta, TaN, WN 等當擴散阻障層已經解決了上述問題。同樣的，銅也會在砷化鎵內擴散效應極快，且在砷化鎵半導體中形成 Deep acceptor，因此過去在砷化鎵之金屬化製程中，並無人使用銅金屬。隨著 IC 製程之進步及銅製程在矽 IC 上之應用成功，證明一些製程上之困難如擴散阻障層及附著性、薄膜應力及可靠性問題等皆可解決，同時並可與次微米製程之圖型化整合，現在矽 IC 製程已被商業上廣泛的應用。本計畫希望將銅製程應用於砷化鎵高頻元件與電路製程上，並驗證其熱穩定性與可靠度測試。

### (二) 研究目的：

在砷化鎵銅金屬化之背面接地製程方面，本實驗室已研究 Ta 和 TaN 做擴散阻障層可以成功有效阻擋銅的擴散，在背後接地銅金屬化有下列效果：(1)電性佳，(2)散熱效果好，(3)機械性質佳，(4)成本低，並應用於砷化鎵 MESFET 並有論文結果發表國際期刊上[5-8]。而在砷化鎵在前端製程方面，銅金屬化主要是在降低傳輸線的電阻，同時亦可降低整體 IC 製作成本(金製程之厚度達  $2\text{-}3 \mu\text{m}$ )。過去砷化鎵 MMIC 之金屬化均是以金為主，由於傳輸線以傳導微波為主，需有較低之電阻，通常電鍍至  $2\text{-}3 \mu\text{m}$  厚度，其中需電鍍之部分含傳輸線，電容，電感等部分。基於以上各項分析，本計畫研究砷化鎵高頻元件銅金屬化研究及可靠性評估，並開發出適合 HEMT 與 HBT 之銅製程與相關的擴散阻障層，證明其對砷化鎵 IC 工業之實質貢獻。

### (三) 研究方法：

#### (1) 正面製程的銅金屬化

在歐姆接觸的銅製程方面，傳統歐姆接觸 n-type 砷化鎵使用 NiGeAu 或 PdGe 系統，p-type 砷化鎵使用 Ti/Pt/Au。本研究不改變歐姆金屬組成，採用在傳統歐姆結構上鍍上阻障層和銅的方式，而形成歐姆金屬/擴散阻障層/銅的多層結構評估其特性。阻障層的選擇使用  $\text{WN}_x$  與 Pt 材料，最後將銅金屬化的歐姆結構在不同溫度下退火，量測這些結構在高溫下的可靠性。

在內連導線方面，將使用銅取代傳統的金，製作方式可以使用傳統的砷化鎵 lift-off 技術，黃光製程後，先鍍上一層擴散阻障層( $\text{WN}_x$  與 Pt)再鍍上銅，之後去除光阻而留下我們所需要的銅導線。在空氣橋方面，將使用銅導線的空氣橋技術來取代傳統的金，此部份的步驟為上完第一道黃光製程光阻後，先用濺鍍方式鍍上擴散阻障層，再上第二道黃光製程後，用電鍍方式將鍍上銅，再用丙酮和 plasma 將光阻去除，而形成銅的空氣橋導線。

## (2) 元件銅金屬化之穩定性及可靠性研究

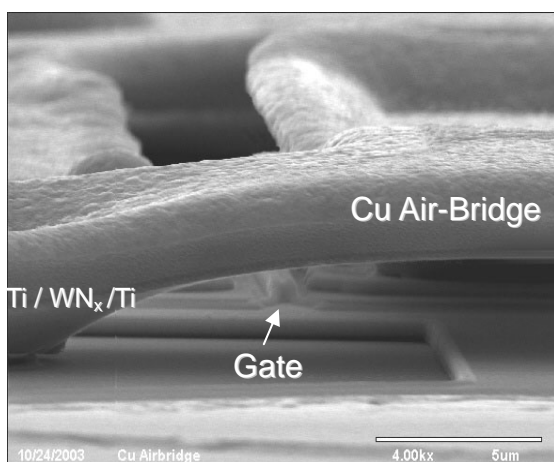
完整製作出銅金屬化的 HEMT 及 HBT 元件，其中包括 HEMT 空氣橋之銅製程化，在 HBT 部分射極、基極和集極之歐姆金屬銅製程化，且內連接導線全使用銅取代金整合銅製程，並研究其可行性。在銅金屬化製程中，由於銅極易擴散進入 GaAs 中產生 deep trap，阻擋銅之擴散阻障層使用  $WN_x$  並搭配 Ti 附著層在 HEMT 元件上，HBT 部分在不使用金的歐姆接觸金屬上則採用 Pt 配合 Ti 作為阻障層，研究其電性隨製程改變之情況，並且和傳統之金導線做一特性比較。為了研究全銅金屬化砷化鎵元件熱穩定性與可靠度，在  $250^\circ\text{C}$  下長時間退火觀察其 I-V curve 及 RF 特性改變。

## (四) 結果與討論：

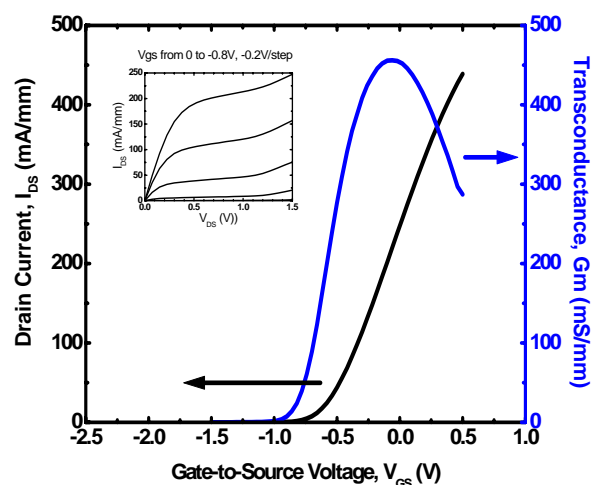
本研究結果依元件種類(HEMT 與 HBT)整理為兩大部分：

### (1) 研究出具有 Ti/ $WN_x$ /Ti 擴散阻障層之銅空氣橋低噪音假晶高電子移動率電晶體(A Copper Airbridged Low-Noise GaAs PHEMT with Ti/ $WN_x$ /Ti Diffusion Barrier)。

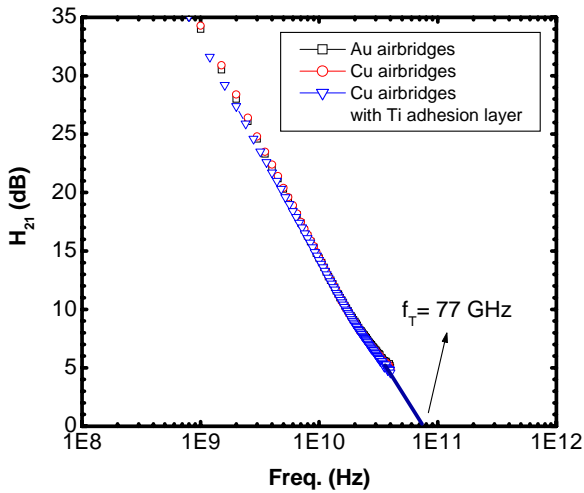
此 PHEMT 尺寸為  $0.25 \times 160 \mu\text{m}^2$  且中使用  $WN_x$  作為銅的擴散阻障層，Ti 則為附著金屬層，並且在銅空氣橋上成長 50nm  $SiN_x$  作為抗氧化層。圖一為 GaAs PHEMT 上 Ti/ $WN_x$ /Ti(30/40/30nm)擴散阻障層之銅空氣橋 SEM 照片。此 PHEMT 在汲極-源極電壓  $V_{DS}=1.5\text{V}$  具有 250 mA/mm 轉導值(gm)為 456mS/mm，詳細的 DC 特性如圖二所示。為了比較銅製程與傳統金製程的差異，銅空氣橋與金空氣橋之 GaAs PHEMT 之電流增益 H21 比較如圖三所示，具有  $SiN_x$  保護層之銅空氣橋 PHEMT 之特性並未有明顯的差異。銅空氣橋元件其截止頻率(cut-off frequency)為 77GHz 與傳統金空氣橋特性相似。在圖四，在 16GHz 的頻率下此 160 $\mu\text{m}$  gate-width 元件由於加上了 Ti 的附著層改善雜訊指數由 1.4 到 0.76dB，且其增益(associated gain)為 9 dB。由於增加 Ti 金屬層大幅改善了 Au/ $WN_x$  與  $WN_x$ /Cu 的介面附著性，因此雜訊指數可以得到有效的改善。可知此具有  $SiN_x$  抗氧化保護層之銅製程可以應用在砷化鎵 PHEMT 之銅空氣橋製作。



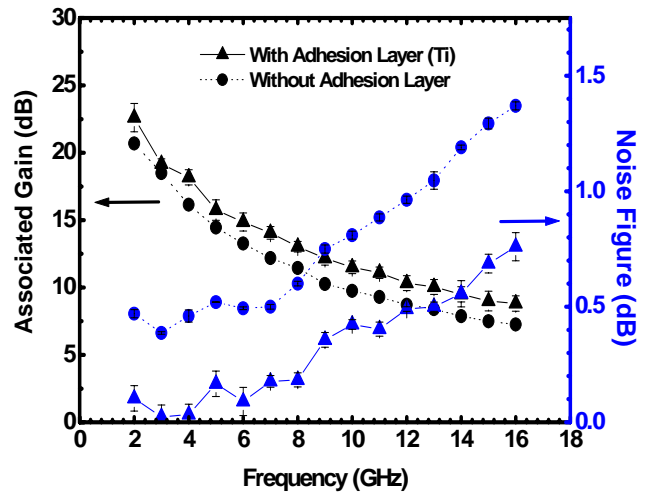
圖一. GaAs PHEMT 上 Ti/ $WN_x$ /Ti 擴散阻障層之銅空氣橋 SEM 照片



圖二. 銅空氣橋 GaAs PHEMT I-V curves 與 gm 值



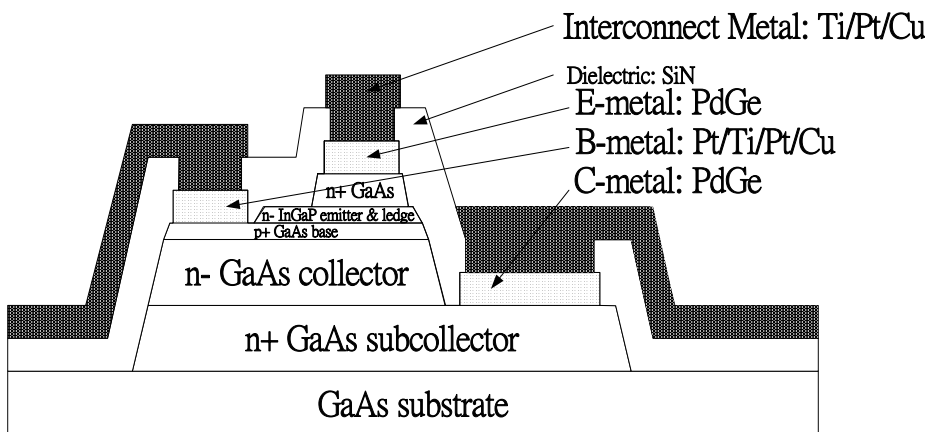
圖三. 銅空氣橋與金空氣橋之 GaAs PHEMT 之電流增益  $H_{21}$  比較



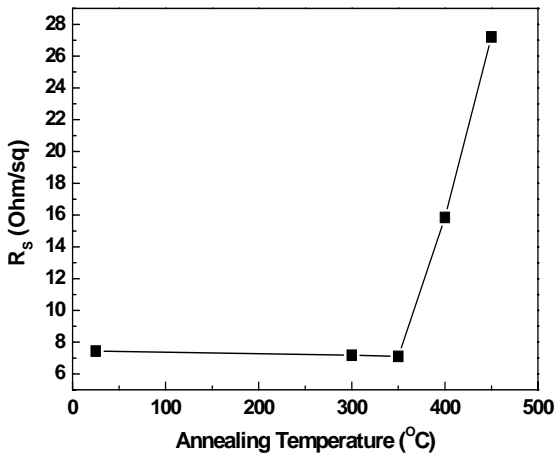
圖四. 具有 Ti 與不具有 Ti 附著層之銅空氣橋 GaAs PHEMT 雜訊指數 NF 比較

(2) 全銅金屬化磷化銦鎵/砷化鎵異質界面雙極電晶體 (A Gold Free Fully Cu Metallized InGaP/GaAs HBT)

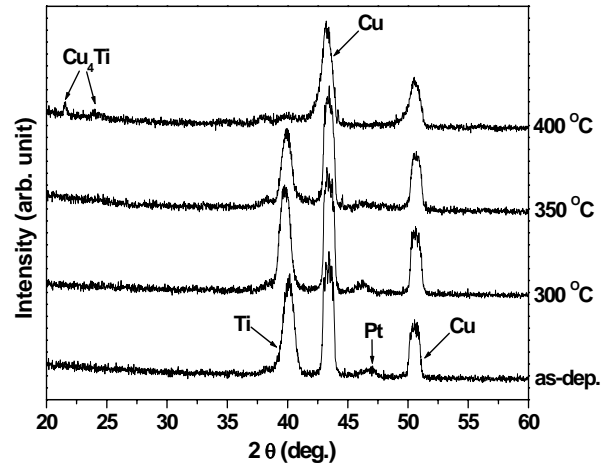
此部分為成功開發出以白金(Pt)為擴散阻障層之全銅金屬化磷化銦鎵/砷化鎵異質界面雙極電晶體。如圖五為元件之結構，Pd/Ge 為 n+type 歐姆接觸金屬，同時使用 Ti/Pt/Cu 為內連接導線，其中 Pt 為擴散阻障層。為了研究 Ti/Pt/Cu 材料系統之熱穩定性，先研究 Ti(50nm)/Pt(50nm)/Cu(400nm) 鍍在 GaAs 測試片，並在氮氣氣氛經過不同溫度 30 分鐘的熱處理後，量測其片阻值變化與 X-ray diffraction (XRD) 圖形，如圖六與圖七。由片阻值與 XRD data 可以發現 Ti/Pt/Cu 在 350°C 以下的熱處理溫度是非常穩定的。圖八為傳統金製程與全銅製程之 4x20 μm 射極(emitter are)HBT  $I_C-V_{CE}$  特性，可發現 Cu 金屬化與傳統的 Au 金屬化之 HBT 元件展現相同的電性。圖九為全銅製程 4x20 μm 射極 HBT 固定  $I_B$  之 Current gain 對熱處理時間圖。圖十與圖十一為全銅製程 4x20 μm 射極 HBT 在 250°C 24 小時熱處理前後之共射極 I-V curves 與  $H_{21}$  比較。



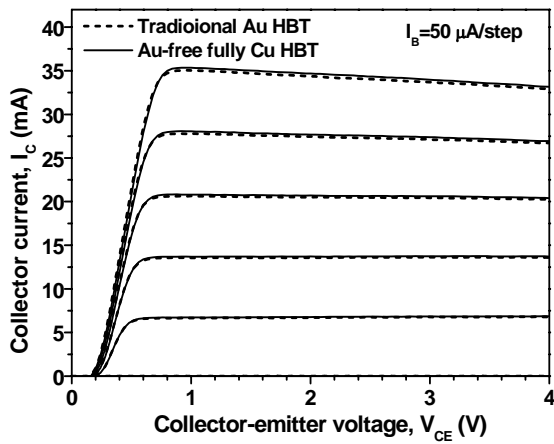
圖五. 全銅金屬化磷化銦鎵/砷化鎵異質界面雙極電晶體之結構圖



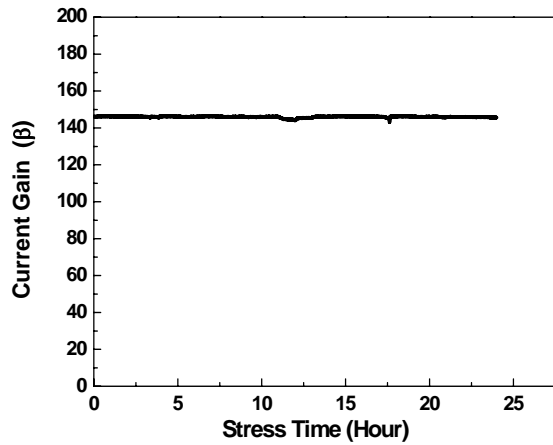
圖六. 經不同溫度熱處理 GaAs/Ti/Pt/Cu 之片阻值變化



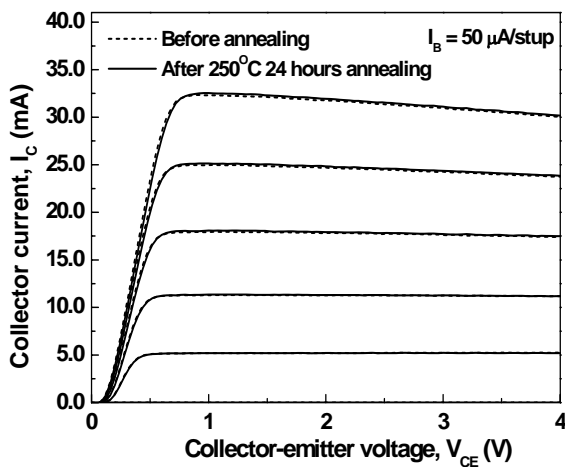
圖七. 經不同溫度熱處理 Ti/Pt/Cu 之 XRD patterns



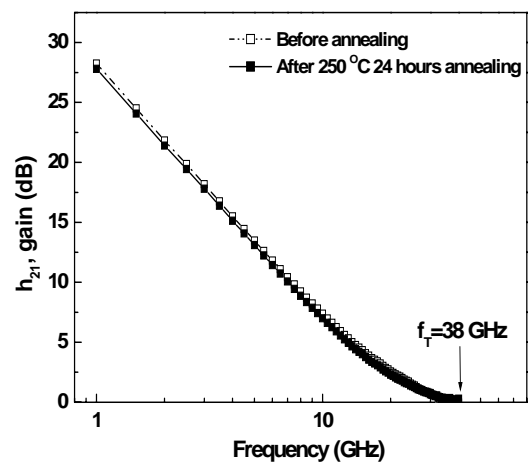
圖八. 傳統金製程與全銅製程之  $4 \times 20 \mu\text{m}$  射極(emitter are)HBT  $I_C$ - $V_{CE}$  特性



圖九. 全銅製程  $4 \times 20 \mu\text{m}$  射極 HBT 固定  $I_B$  之 Current gain 對熱處理時間圖



圖十. 全銅製程  $4 \times 20 \mu\text{m}$  射極 HBT 在  $250^\circ\text{C}$  24 小時熱處理前後之共射極 I-V curves



圖十一. 全銅製程  $4 \times 20 \mu\text{m}$  射極 HBT 在  $250^\circ\text{C}$  24 小時熱處理前後之  $H_{21}$  比較

全銅金屬化 HBT 在經過以上電流加速測試(current accelerated stress test)在 140 kA/cm<sup>2</sup> 持續 24 hours 與熱穩定測試(thermal stress test)250 °C 持續 24 hours 之後其電性保持一致沒有明顯變化。此研究結果證明使用 Pd/Ge 與 Pt/Ti/Pt/Cu 作為接觸金屬之全銅金屬化之 InGaP/GaAs HBTs 之可行性，並證明了其中 Pt 作為擴散阻障層可有效避免銅的擴散。

(五) 計劃自評：

由於砷化鎵之銅製程研究目前還在起步階段，因此材料之研究及元件製程之研發在國內外可說是首創，此研究成果將對砷化鎵 IC 製程工業有實質貢獻，可以將銅取代傳統的金，將可使散熱特性更好，機械性質變強，同時更可以降低成本。

(六) 參考資料：

1. Mayumi Takeyama, Atsushi Noya, Touko sase, and Akira ohta. "Properties of TaN films as diffusion barriers in thermally stable Cu/Si Contact systems", J. Vac. Sci. Technol. B 14(2) Mar/Apr 1996.
2. Kyung-Hoon Min, Kyu-chang Chun, and Ki-Bum Kim "Comparative study of Tantalum and tantalum nitrides (Ta<sub>2</sub>N and TaN) as a diffusion barrier for Cu metallization", J. Vac. Sci. Technol. B. 14(5), Sep/Oct 1996.
3. Takeo Oku, Eiji kawakami, "Diffusion barrier property of TaN between Si and Cu", Applied Surface Science 99(1996) 265-272.
4. Dong Joon Kim and Yong Tae Kim, "Nanostructured Ta-Si-N diffusion barriers for Cu metallization" J. Appl. Phys. 82 (10). 15 November 1997.
5. Backside copper metallization of GaAs MESFETs using Ta or TaN as the diffusion barrier" in *the meeting abstracts of the 197th Meeting of the Electrochemical Society*, abstract no. 436, Toronto, May 14-19, 2000.
6. "Thermal Stability of Cu/Ta/GaAs Multilayers", *Applied Physics Letter*, Vol.77, No. 21, pp. 3367-3369, 2000.
7. "Backside copper metallization of GaAs MESFETs using TaN as the diffusion barrier", *IEEE Transactions on Electron Devices*.2000.
8. "Backside copper metallization of GaAs MESFETs", *IEE Electronics Letters*, vol. 36, no. 15, 2000.