

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

應用在 Ku 波段之摻雜及非摻雜氮化鎵高功率微波元件之製作及高頻特性量測與比較(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2215-E-009-046-

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

處理方式：本計畫可公開查詢

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 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(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

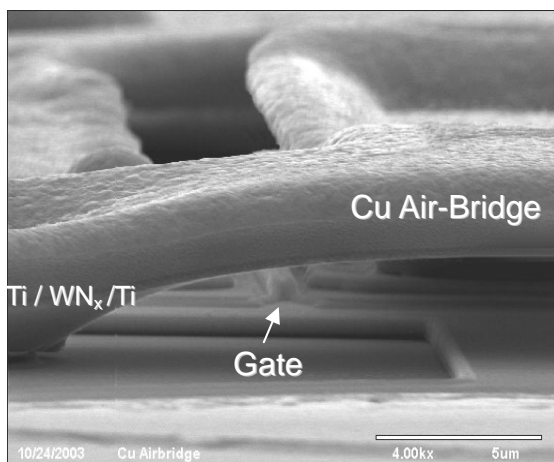
完整製作出銅金屬化的 HEMT 及 HBT 元件，其中包括 HEMT 空氣橋之銅製程化，在 HBT 部分射極、基極和集極之歐姆金屬銅製程化，且內連接導線全使用銅取代金整合銅製程，並研究其可行性。在銅金屬化製程中，由於銅極易擴散進入 GaAs 中產生 deep trap，阻擋銅之擴散阻障層使用 WN_x 並搭配 Ti 附著層在 HEMT 元件上，HBT 部分在不使用金的歐姆接觸金屬上則採用 Pt 配合 Ti 作為阻障層，研究其電性隨製程改變之情況，並且和傳統之金導線做一特性比較。為了研究全銅金屬化砷化鎵元件熱穩定性與可靠度，在 250°C 下長時間退火觀察其 I-V curve 及 RF 特性改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

(四) 結果與討論：

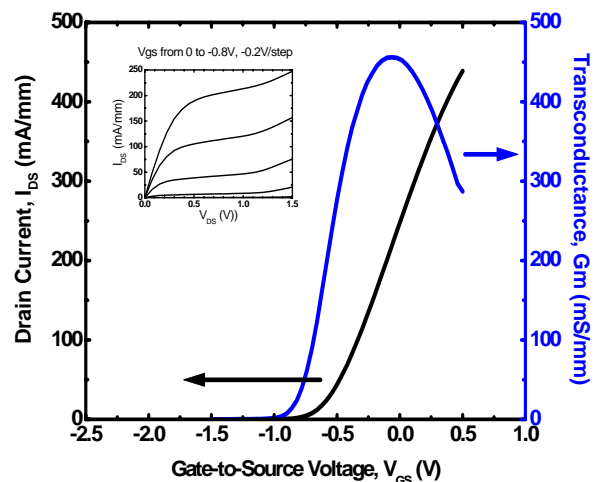
本研究結果依元件種類(HEMT 與 HBT)整理為兩大部分：

(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)。

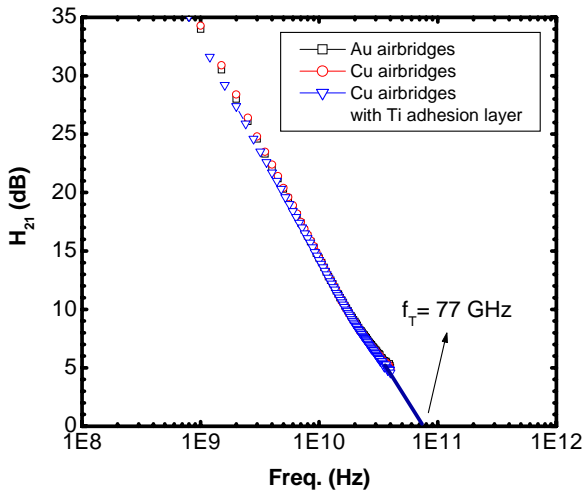
此 PHEMT 尺寸為 $0.25 \times 160 \mu\text{m}^2$ 且中使用 WN_x 作為銅的擴散阻障層，Ti 則為附著金屬層，並且在銅空氣橋上成長 50nm SiN_x 作為抗氧化層。圖一為 GaAs PHEMT 上 Ti/ WN_x /Ti(30/40/30nm)擴散阻障層之銅空氣橋 SEM 照片。此 PHEMT 在汲極-源極電壓 $V_{DS}=1.5\text{V}$ 具有 250 mA/mm 轉導值(gm)為 456mS/mm ，詳細的 DC 特性如圖二所示。為了比較銅製程與傳統金製程的差異，銅空氣橋與金空氣橋之 GaAs PHEMT 之電流增益 H21 比較如圖三所示，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。



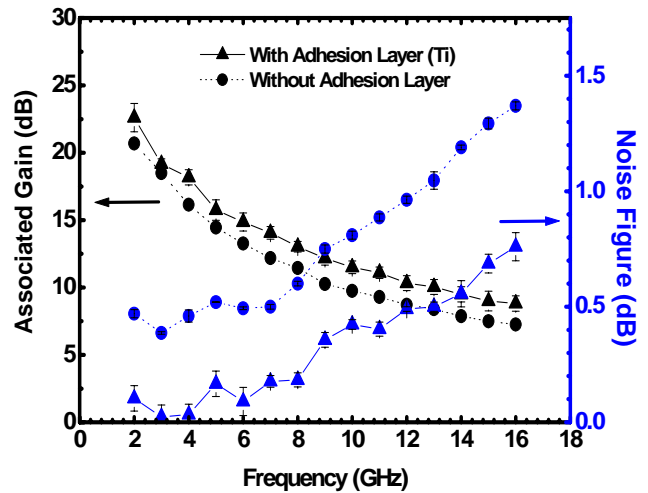
圖一. GaAs PHEMT 上 Ti/ WN_x /Ti 擴散阻障層之銅空氣橋 SEM 照片



圖二. 銅空氣橋 GaAs PHEMT I-V curves 與 gm 值



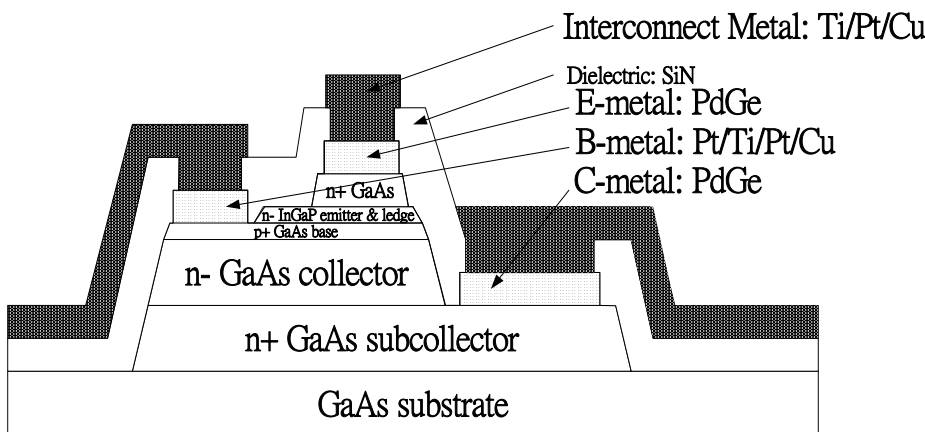
圖三. 銅空氣橋與金空氣橋之 GaAs PHEMT 之電流增益 H_{21} 比較



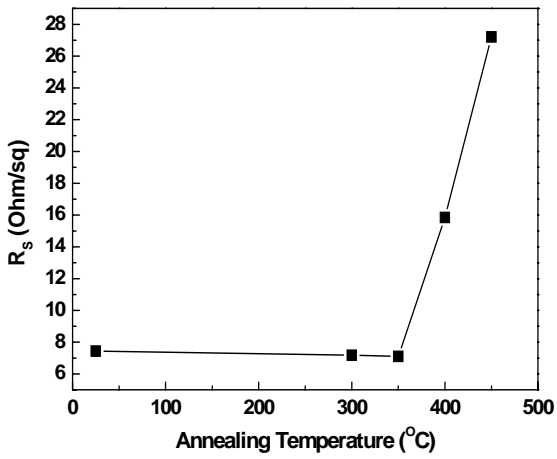
圖四. 具有 Ti 與不具有 Ti 附著層之銅空氣橋 GaAs PHEMT 雜訊指數 NF 比較

(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)

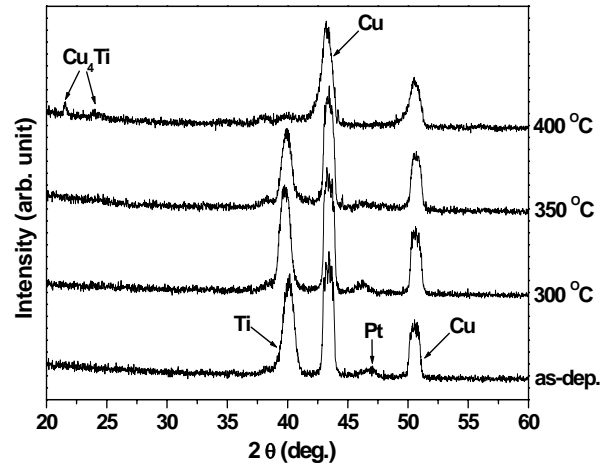
此部分為成功開發出以白金(Pt)為擴散阻障層之全銅金屬化磷化銦鎵/砷化鎵異質界面雙極電晶體。如圖五為元件之結構，Pd/Ge 為 n+type 歐姆接觸金屬，同時使用 Ti/Pt/Cu 為內連接導線，其中 Pt 為擴散阻障層。為了研究 Ti/Pt/Cu 材料系統之熱穩定性，先研究 Ti(50nm)/Pt(50nm)/Cu(400nm) 鍍在 GaAs 測試片，並在氮氣氣氛經過不同溫度 30 分鐘的熱處理後，量測其片阻值變化與 X-ray diffraction (XRD) 圖形，如圖六與圖七。由片阻值與 XRD data 可以發現 Ti/Pt/Cu 在 350°C 以下的熱處理溫度是非常穩定的。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。



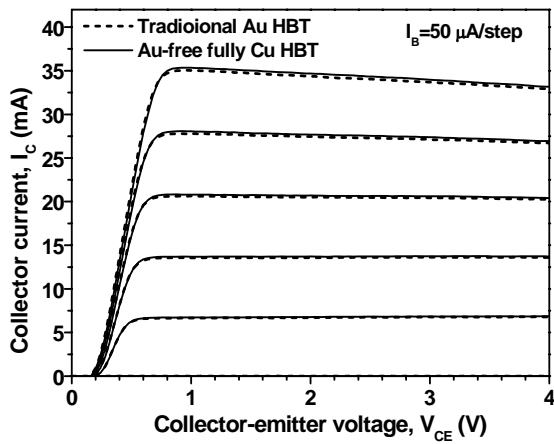
圖五. 全銅金屬化磷化銦鎵/砷化鎵異質界面雙極電晶體之結構圖



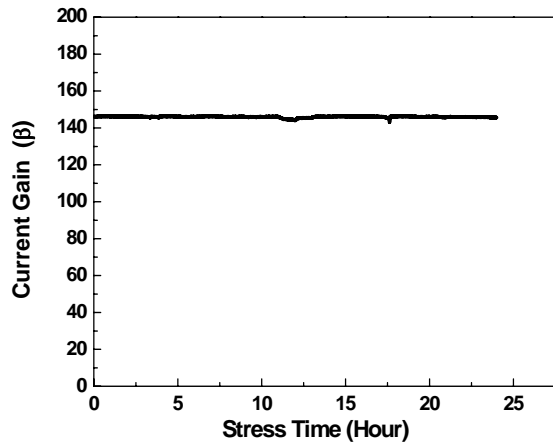
圖六. 經不同溫度熱處理 GaAs/Ti/Pt/Cu 之片阻值變化



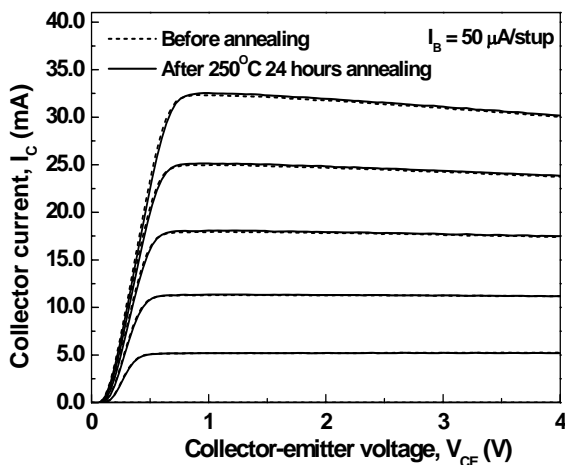
圖七. 經不同溫度熱處理 Ti/Pt/Cu 之 XRD patterns



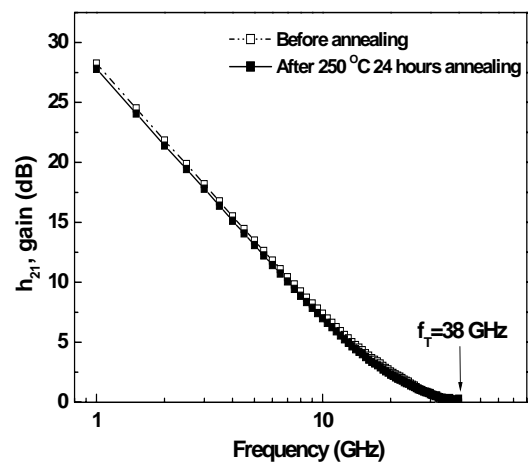
圖八. 傳統金製程與全銅製程之 $4 \times 20 \mu\text{m}$ 射極(emitter are)HBT I_C - V_{CE} 特性



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°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°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/cm² 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 (Ta₂N 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.