

半導體微波退火設備開發

Development of Semiconductor Microwave Annealing Equipment

黃昆平^{1*}、張志振²、胡竹生³、趙天生⁴、李耀仁⁵

¹ 工研院機械所先進技術組 資深研究員

² 工研院機械所先進技術組 工程師

³ 工研院機械所 工研院機械所 所長

⁴ 交通大學電物系 教授

⁵ 國家奈米元件實驗室 研究員

摘要：若對材料施以正確的電磁波頻率，可對材料於較低溫度完成退火，達到節能減碳的目的。在工業上對微波頻段的電磁波吸收良好材料，若對工件施以微波加熱或退火，可於較低溫及較短時間就達到加熱或退火目的，同時達到節能及省時的功效。本文將介紹低頻微波 (2.45 GHz) 加熱技術於半導體摻質活化之應用，以低溫微波退火避免摻雜質擴散，以符合未來半導體 5 nm 以下之前段製程需求。

Abstract : Having the magnetic wave -- set at a chosen frequency -- applied to the material, it can finish annealing process at lower temperature, which serves the purpose of energy saving and carbon reduction. In industry, we certain materials are found to be excellent at absorbing microwave-band electromagnetic waves. When we have workpieces made of these absorbent materials which are subjected to microwave heating or annealing, they can be heated or annealed at a lower temperature for a short time, implying effective in energy and time saving. This article will introduce the application of low frequency microwave (2.45 GHz) heating technology in semiconductor doping and activation, and the use of low-temperature microwave annealing that can help avoid the diffusion of dopants to meet the front-end process requirements of semiconductors below 5 nm and beyond in the future.

關鍵詞：微波、半導體、退火

Keywords : Microwave, Semiconductor, Annealing

前言

熱阻絲、紅外光或雷射等是傳統半導體係晶圓的加熱退火方式，隨著摩爾定律的演進，閘極線寬越做越窄，當線寬小於 5 nm 時，若摻雜物質擴散至淺界面 (Shallow Junction) 以外區域，造成漏電流上升致使元件失效。因此，為避免摻雜物質於活化過程發生擴散現象，降低活化溫度是最

有效的方法。特別是在未來半導體為了提升載子移動速率 (Carrier Mobility) 在源極及集極摻入鍍元素後，使得 N 型摻雜的磷或砷元素後高溫退火活化時，較在純矽時擴散速率快 1.5 倍左右 [1-11]，如圖 1 所示。因此亟需發展摻雜物質的低溫退火活化技術，以因應未來半導體製程技術的演進。

微波加熱的好處有空間均勻、快速加熱率、降低作用時間及作用溫度、優化微結構，也因此

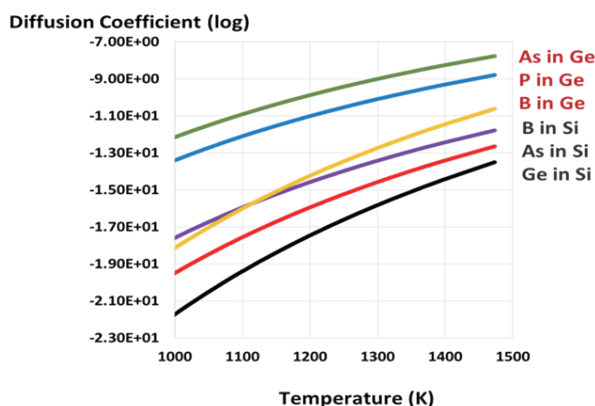


圖 1 摻雜元素在 Si 及 Ge 的擴散係數

增加了機械性及電性，也有較佳的製程效率、選擇性加熱、低環境因素影響、及節省能量 [12]。由於屬於矽晶圓是純矽材料，因矽元素介電係數 11.9 及介電損失 0.004[13]，可對微波直接吸收並達到加熱退火的目的，因此近來半導體開始採用微波退火活化摻雜物質。微波退火除了可讓半導體前段製程之摻雜物質達到低溫活化及無擴散的需求外，亦具有多片同時活化的潛力。這對半導體製程日益嚴苛的熱預算無疑是有一大幫助，同時對節能減碳及降低成本亦有相當大的幫助。

根據通訊技術領域協定，工業、科學及醫療微波頻段 (ISM Band) 使用的頻率是 800 MHz、2.45 GHz、5.8 GHz 及 13 GHz。對於十二吋晶圓而言，微波退火的均勻性是需達 99% 以上。然而微波的模態數與頻率平方成正比，頻率越高均勻性越佳，但價格亦相對昂貴。目前，工業界有開發 5.8 GHz 之半導體微波退火設備，唯 5.8 GHz 磁控管壽命短及價格昂貴是其缺點。

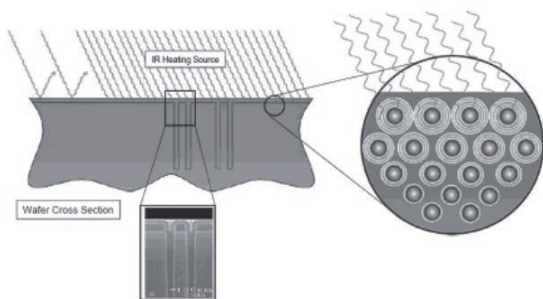


圖 2 (a) 紫外或紅外光僅對矽晶圓表面加熱

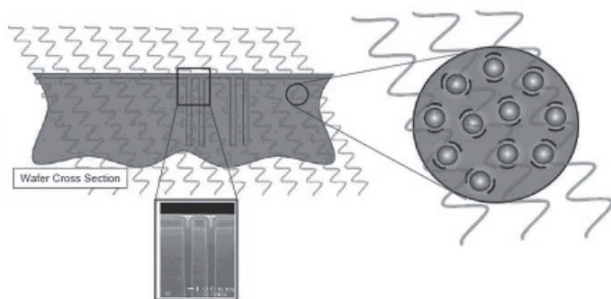


圖 2 (b) 微波穿透矽晶圓對矽晶格原子直接加熱

本研究是開發使用一般工業常用的 2.45 GHz 磁控管作為半導體摻雜物質活化之微波源，其具有壽命長及價格低廉之優點，並輔以創新之縱橫奇偶模態及耦合模態，以彌補低頻微波模態數不足之缺點，使之符合半導體工業之標準。本文將探討，2.45 GHz 與 5.8 GHz 微波退火之比較，及半導體微波退火設備之未來發展。

矽晶格對電磁波的吸收

紫外光雷射照射矽晶圓，紫外光會直接與矽原子外層軌道電子作用，讓電子躍遷至更高的軌域；紅外光照射矽晶圓，紅外光會對矽原子間之共用電子產生交互作用，並使其從基態躍遷至激發態；若是用微波照射矽晶圓，微波會對矽原子間的鍵結產生振動，由於鍵結往復運動產生內摩擦熱使物質內外同時加熱升溫。紫外光及紅外光的電磁波頻率較微波高，由於趨膚效應 (Skin Effect)，在矽介質中衰減很快，其只能對矽晶圓表面直接加熱，至於內部摻雜物質的活化，只能靠表面高溫熱傳導至內部；因此採用相對較低頻的微波加熱方式，其電磁波可穿透十二吋矽晶圓，可對晶圓內部晶格原子直接加熱如圖 2 [23]，達到低溫退火目的，特別是對半導體五奈米以下製程，可避免摻雜原子擴散造成漏電流上升如圖 3。

矽原子的共價鍵結會對微波頻段電磁波產生吸收，連帶的與矽原子與摻雜原子活化的共價鍵結亦會對微波頻段電磁波產生吸收。可利用網路分析儀對矽晶圓上之共面微帶線進行掃頻如圖 4，分別找出矽原子鍵結本身、或與 BF_2 (P-type) 及 As (N-type) 鍵結對微波吸收之頻率。由圖 5 知，矽原

更完整的內容

詳見【機械工業雜誌】423 期・107 年 6 月號

機械工業雜誌・每期 220 元・一年 12 期 2200 元

劃撥帳號：07188562 工業技術研究院機械所

訂書專線：03-591-9339

傳 真：03-582-2011

機械工業雜誌・官方網站：www.automan.tw

機械工業雜誌・信箱：jmi@itri.org.tw