

## Abstract

The use of heavy copper wire-bonds as topside contact in the assembly and interconnect technology (AIT) of silicon-based power modules promises a more than tenfold increase of the thermal cycling reliability of the assembly over the currently used heavy aluminum wires. This increase is contrasted by the increased hardness of copper over aluminum. To date, the higher hardness of the thick copper wires requires a higher bonding force and ultrasonic power for an adequate bond formation which induces a strong deformation of the available power device topside metallizations and leads to a destruction of the devices. Based on the state-of-the-art Back-End-of-Line process chain, a new copper metallization scheme is developed. The plan is adapted for specific process steps to acknowledge the characteristic differences of the deposition and usage of copper on silicon devices. The microstructural, mechanical and electrical properties of the copper metallization as well as the impact of boundary conditions and process parameters thereon are investigated in the first part of this thesis. The second part is dedicated to a fundamental analysis on the use of heavy copper wire-bonds with a diameter of 300  $\mu\text{m}$  on silicon power devices. Based upon these results, the mutual impact of the previously determined copper metallization properties and the bonding process is derived. It is further shown on  $n^+p$  diodes that the diffusion of copper into silicon irreversibly leads to a heavy degradation of the electrical device characteristics. Therefore, the introduction of a titanium-nitride and a tantalum-nitride diffusion barrier are regarded and their blocking-capability is observed. Depending on the copper metallization, the bonding process can further induce a damage to the diffusion barrier without a direct mechanical destruction of the device. In contrast to a directly visible mechanical damage, a degradation of the diffusion barrier is only detectable after a subsequent thermal activation. The failure mechanisms become evident by the microstructural analysis of the bond-pad which clarifies the correlation between the Cu microstructure and the bonding process. From the entirety of the results, the boundary conditions for the design of a copper metallization which enables the use of heavy copper wire-bonding, are derived.

## Kurzzusammenfassung

Die Verwendung von Kupfer-Dickdrahtbonds für die oberseitige Anbindung bei der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) von Silizium-basierten Leistungshalbleitern verspricht eine um mehr als zehnfach höhere Zuverlässigkeit im Hinblick auf die Temperaturwechselfestigkeit des Aufbaus im Vergleich zu den derzeit verwendeten Aluminium-Dickdrahtbonds. Die höhere Härte von Kupfer-Dickdraht verhindert dabei bisher dessen Verwendung, da die für eine adäquate Bondausbildung erforderlichen höheren Bondkräfte und Ultraschalleistungen zu einer übermäßigen Deformation und Zerstörung der aktuell verfügbaren oberseitigen Metallisierungen und damit der Bauelemente führt. Ausgehend von Prozessabfolgen gemäß dem Stand der Technik, wird in der vorliegenden Arbeit eine neuartige Kupfermetallisierung entwickelt, die die Besonderheiten der Abscheidung und der Verwendung von Kupfer auf Silizium berücksichtigt. Im ersten Teil der Arbeit werden die mikrostrukturellen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Kupfermetallisierung sowie verschiedene Einflussgrößen darauf intensiv untersucht. Im zweiten Teil werden grundlegende Untersuchungen zur Verwendung von Kupfer-Dickdrahtbonds mit einem Drahtdurchmesser von 300  $\mu\text{m}$  auf Silizium-Leistungshalbleitern vorgestellt. Daraus folgend wird der gegenseitige Einfluss zwischen den zuvor analysierten Eigenschaften der Kupfermetallisierung und dem Bondprozess ermittelt. Es wird anhand von  $n^+p$ -Dioden gezeigt, dass die Diffusion von Kupfer in Silizium zu einer schwerwiegenden unumkehrbaren Degradation der elektrischen Bauelementecharakteristik führt. Daher wird die Einführung einer Diffusionsbarriere aus Titanitrid oder Tantalnitrid und die Zuverlässigkeit derselben betrachtet. In Abhängigkeit der Härte der Kupfermetallisierung kann es zudem durch den Bondvorgang zu einer Schädigung der Diffusionsbarriere kommen, ohne dass es direkt zu einer mechanischen Zerstörung des Bauelementes kommt. Im Gegensatz zu einer direkten Schädigung ist diese Degradation nur durch eine nachfolgende thermische Aktivierung feststellbar. Die verschiedenen Schädigungsmechanismen werden unter Zuhilfenahme von physikalischen Analysemethoden deutlich gemacht. Dabei wird der gegenseitige Zusammenhang zwischen der Mikrostruktur der Kupfermetallisierung und dem Bondprozess ersichtlich. Aus den Ergebnissen werden abschließend Randbedingungen abgeleitet, unter denen eine zuverlässige Kupfermetallisierung schädigungsfrei hergestellt und durch Kupfer-Dickdrahtbonds kontaktiert werden kann.