

Evaluation of Solder Joints on Aluminum Surfaces for the Interconnection of Silicon Solar Cells

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Informatik und Elektrotechnik
der Universität Rostock

Vorgelegt von
Angela De Rose, M. Sc.

April 2021

**Universität
Rostock**



Traditio et Innovatio

Abstract

In this thesis, direct soldering of aluminum is investigated, with a special focus on application in the photovoltaic industry. The native Al_2O_3 layer impedes the solderability of Al components. However, strong solder joints can be formed when suitable surface coatings are used. The formation of solder joints and the relevant fundamental properties of these joints and coatings are evaluated.

For silicon solar cells, the rear electrode is typically made from Al, and expensive Ag rear pads are used for soldering instead of coatings. The established high-throughput interconnection equipment and the processes of the photovoltaic industry are used as a baseline in this work. With this, reliable soldering of Al at ambient air using temperatures of around 250°C and no-clean flux is demonstrated.

A systematic evaluation of solder joints is presented to determine essential properties of the joints. The findings are correlated to the different coating materials to identify suitable material combinations. Solderable layers are deposited on Al by three different coating techniques. First, mechanical joining of Al and a solderable layer is done by roll cladding. Also, a wet-chemical coating by a zincate treatment and electroless plating is used. Lastly, thin solderable layers are deposited on Al by magnetron sputtering. Several material combinations of different layer thicknesses are tested. The wettability of the coatings with solder is characterized by means of the optical contact angle, as a simple method to assess the solderability. A systematic comparison of different coating thicknesses reveals a minimum required layer thickness for good wettability, strongly depending on the deposition method.

After soldering of the differently coated Al, an in-depth analysis of SnPb-based solder joints is performed, using several characterization techniques. The mechanical strength of the solder joints is investigated by a 90° peel force measurement, yielding a good correlation with the initial wetting tests. Solder joints on $200\ \mu\text{m}$ thick coated Al foils show high peel forces of $3\ \text{N mm}^{-1}$ to $8\ \text{N mm}^{-1}$ for all three coating approaches. The electrical properties of the solder joints on all coatings have shown to be uncritical for the solar cell with $< 20\ \mu\Omega\ \text{cm}^2$. Isothermal aging at 85°C and 125°C is performed and several stable coatings are identified.

Using electron microscopy (SEM, TEM), the interfaces of the solder joints are analyzed with high resolution, regarding homogeneity and defects. In combination with EDX spectroscopy it is shown that diffusion zones and/or phase formation in the interfacial regions support adhesion of the material systems.

The most promising material combinations are tested on the Al rear side of Si solar cells. For wet-chemically and sputter-coated Al, a successful interconnection process is realized by infrared soldering on an industrial stringer with fast soldering times $< 2\ \text{s}$. The implementation on Si solar cells is tested for FoilMet[®] solar cells with Al foil rear side and modified passivated emitter and rear cells (PERC) with PVD Al rear side. *I-*

V measurements and electroluminescence imaging of 1-cell-modules prove a successful module integration. A loss in module power of less than 2% is achieved after 200 thermal cycles in a climate chamber, on the same level as the current state-of-the-art PERC technology. Possible failure mechanisms of the solder joints are analyzed in detail on solar cell and module level. The overall results of the solder joint evaluation show the high potential of direct contacting Al for Si solar cells, by suitable coatings, in which established processes and tools of the photovoltaic industry can be used.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wird die direkte Lötbarkeit von Aluminium, mit dem Ziel der Anwendung in der Photovoltaik Industrie, untersucht. Die natürliche Al_2O_3 Oxidschicht erschwert das Weichlöten von Aluminiumbauteilen. Dennoch ist es möglich, unter der Verwendung einer geeigneten Oberflächenbeschichtung, starke Lötverbindungen auszubilden. Die Lötstellen, deren relevante Eigenschaften, sowie die der Beschichtungen, werden in der vorliegenden Arbeit evaluiert.

Die Rückseitenelektrode von Siliciumsolarzellen wird typischerweise aus Al hergestellt, wobei statt Beschichtungen zusätzliche teure Silberflächen als Lötkontakte genutzt werden. Als Grundlage für die Verschaltung in dieser Arbeit werden die in der Photovoltaik etablierten Hochdurchsatzanlagen und -prozesse verwendet. Unter diesen Bedingungen wird zuverlässiges Weichlöten von Al an Umgebungsluft bei Temperaturen um 250°C mit no-clean Flussmittel demonstriert.

Um grundlegende Eigenschaften der Lötstellen zu bestimmen, wird eine systematische Bewertung der Lötstellen durchgeführt. Die Erkenntnisse werden mit den verschiedenen Beschichtungsmaterialien korreliert, um geeignete Materialkombinationen zu identifizieren. Es werden drei Beschichtungstechnologien verwendet, um lötbare Schichten auf Al abzuscheiden. Zum einen wird mechanisches Fügen von Al und einer lötbaren Schicht mittels Walzplattierung realisiert. Außerdem erfolgt die nasschemische Behandlung von Al mit Zinkatbeize und Nickelplating. Zuletzt wird die Abscheidung dünner Schichten mittels Sputterverfahren genutzt. Es wird eine Vielzahl von Materialkombinationen und -dicken untersucht. Ihre Benetzbarkeit mit flüssigem Weichlot wird mittels optischer Kontaktwinkelmessung bewertet, einer einfachen Methode um die Lötbarkeit zu testen. Ein systematischer Vergleich verschiedener Beschichtungsdicken zeigt, abhängig von der jeweiligen Beschichtungsmethode, eine benötigte minimale Dicke für gute Benetzbarkeit.

Nach dem Weichlöten des beschichteten Al wird eine eingehende Analyse von Zinn-Blei-Lötstellen mittels diverser Charakterisierungsverfahren durchgeführt. Die mechanische Festigkeit der Lötstellen wird mit einem 90° Abzugstest untersucht, wobei eine gute Korrelation der Ergebnisse mit den Benetzungstests beobachtet wird. Lötstellen auf $200\ \mu\text{m}$ dicker beschichteter Aluminiumfolie erzielen hohe Haftkräfte zwischen $3\ \text{N mm}^{-1}$ und $8\ \text{N mm}^{-1}$. Die elektrischen Eigenschaften der Lötstellen für alle Beschichtungen liegen im für die Solarzelle unkritischen Bereich $< 20\ \mu\Omega\ \text{cm}^2$. Durch isotherme Alterung bei 85°C und 125°C werden mehrere temperaturstabile Kombinationen identifiziert.

Mittels Elektronenmikroskopie (REM, TEM) werden die Grenzflächen der Lötstellen bei hoher Auflösung hinsichtlich Homogenität und Defekten analysiert. Durch Kombination mit EDX Spektroskopie wird gezeigt, dass Diffusion und/oder Phasenbildungen an den Grenzflächen zur Verbesserung der Verbundhaftung führen.

Die vielversprechendsten Materialkombinationen werden auf der Aluminiumrückseite von Siliciumsolarzellen getestet. Für nasschemisch und sputterbeschichtetes Al wird ei-

ne erfolgreiche Verschaltung mittels Infrarotlöten auf einem Industriestruinger mit Lötzeiten < 2 s realisiert. Die Umsetzung auf Siliciumsolarzellen wird für FoilMet[®]- und PERC-Solarzellen mit PVD Aluminiumrückseite getestet. Die Charakterisierung von 1-Zell-Modulen mittels I - V und EL Messungen weist eine erfolgreiche Modulintegration nach. Nach 200 Zyklen termischer Wechsellast in Klimakammertests wird ein Leistungsverlust von weniger als 2% demonstriert. Dies entspricht dem Stand aktuell etablierter PERC Technologie. Mögliche Fehlermechanismen der Lötstellen werden im Detail auf Zell- und Modulebene analysiert. Mithilfe der umfassenden Analyse der Lötstellen, kann das hohe Potential dieses Ansatzes zur direkten Lötbarkeit von Aluminium für Siliciumsolarzellen gezeigt werden, wobei bereits etablierte Prozesse und Anlagen aus der Photovoltaikindustrie genutzt werden können.