Transfer of the Metal Wrap Through Solar Cell Concept to n-Type Silicon

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Technischen Fakultät
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau

vorgelegt von

Elmar Lohmüller

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)
Freiburg im Breisgau

2015

Dekan:
Prof. Dr. Georg Lausen

Erstgutachter:
Prof. Dr. Holger Reinecke
Zweitgutachter:
Prof. Dr. Gerhard Willeke

Vorsitzender der Prüfungskommission:
Prof. Dr. Moritz Diehl
Beisitzer:
Prof. Dr. Roland Zengerle

Datum der Prüfung: 18.12.2015

Institut für Mikrosystemtechnik
Technische Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Schriftenreihe der Reiner Lemoine-Stiftung

Elmar Lohmüller

Transfer of the Metal Wrap Through Solar Cell Concept to n-Type Silicon

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2015

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4196-5
ISSN 2193-7575

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

"Twenty years from now you will be more disappointed by the things you didn't do than by the ones you did do. So throw off the bowlines. Sail away from the safe harbor. Catch the trade winds in your sails.
Explore. Dream. Discover."

Mark Twain (1835 – 1910)

Abstract

This thesis presents the transfer of the metal wrap through (MWT) solar cell concept from *p*-type to *n*-type crystalline Czochralski-grown silicon (Cz-Si) wafers with 156 mm edge length. An industrially-feasible MWT solar cell structure with screen-printed metallization is developed, which combines the advantages of *n*-doped silicon with those of a rear contact cell structure. The conversion efficiency of the fabricated solar cells increases continuously within various development cycles. The studies focus on reverse bias stability, emitter diffusion, and electrical contacting of highly boron-doped surfaces. Specific characterization of the reverse bias behavior of the solar cells point out the major challenge to be overcome for a reliable operation after module encapsulation. The vias and the rear *p*-type contacts represent the most important MWT specific structures. Detailed investigations result in optimizations and process simplifications with respect to the rear contact configuration. The maximum energy conversion efficiency achieved for large-area *n*-type Cz-Si MWT solar cells within this work is 20.4%. Analytical calculations yield a potential energy conversion efficiency of almost 22% for *n*-type Cz-Si MWT solar cells by integration of technological improvements.

New tube furnace diffusion processes are developed to form deep driven-in boron dopings with low surface concentration in a single process step. The emitters formed therewith feature low dark saturation current density of (30 ± 3) fA/cm^2 for passivated and textured surface with a sheet resistance of about 120 Ω/sq. Despite low maximum dopant concentration of only $(1.8 \pm 0.2)\cdot 10^{19}$ cm^{-3}, low specific contact resistance of less than 4 mΩcm^2 is obtained for screen-printed and fired metal contacts. It is experimentally shown for the first time that the depth-dependent course of the dopant concentration contributes to a low-ohmic contact formation. This correlation is also demonstrated by means of an analytical model which is based on metal crystallites. Furthermore, it is shown that charge carrier recombination underneath the metal contacts correlates with both the metal crystallites and the junction depths of the boron dopings.

The progress in emitter formation and the improved understanding of metallization related issues are also of high interest for other solar cell types. Furthermore, findings from this thesis also contributed fundamentally to the ongoing development in *p*-type MWT solar cell technology.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich damit, das „Metal Wrap Through" (MWT) Solarzellenkonzept von p-dotierten auf n-dotierte Substrate zu übertragen, die aus kristallinem Czochralski-Silicium (Cz-Si) mit einer Kantenlänge von 156 mm bestehen. Es wird eine industriell umsetzbare MWT-Solarzellenstruktur mit siebgedruckter Metallisierung entwickelt, welche die Vorteile von n-dotiertem Silicium mit den Vorteilen einer rückseitig kontaktierten Zellstruktur vereint. Die Effizienz der hergestellten Solarzellen steigt über mehrere Entwicklungszyklen hinweg kontinuierlich an. Die Untersuchungen beschäftigen sich vor allem mit der Rückwärtsstabilität, der Emitterdiffusion und der elektrischen Kontaktierung stark Bor-dotierter Oberflächen. Die Herausforderungen, die für einen zuverlässigen Betrieb nach Moduleinkapselung überwunden werden müssen, werden durch spezifische Untersuchungen des Verhaltens der Solarzellen unter Rückwärtsspannung aufgezeigt. Die Durchkontaktierungen (Vias) und die rückseitigen p-Kontakte bilden die wichtigsten MWT-spezifischen Strukturen. Die rückseitige Kontaktanordnung konnte im Zuge detaillierter Untersuchungen optimiert und deren Herstellung vereinfacht werden. Der erreichte Wirkungsgrad für großflächige MWT-Solarzellen aus n-dotiertem Cz-Si beträgt 20,4%. Analytische Berechnungen zeigen ein Effizienzpotenzial von nahezu 22% für MWT-Solarzellen aus n-dotiertem Cz-Si bei Integration technologischer Verbesserungen auf.

Neue Rohrofen-Diffusionsprozesse werden entwickelt, um tief eingetriebene Bordotierungen mit geringer Oberflächenkonzentration in einem einzigen Prozessschritt auszubilden. Die damit hergestellten Emitter weisen eine geringe Dunkelsättigungsstromdichte von (30 ± 3) fA/cm^2 für eine passivierte und texturierte Oberfläche und einen Schichtwiderstand von ungefähr 120 Ω/sq auf. Trotz geringer maximaler Dotierkonzentration von nur $(1{,}8 \pm 0{,}2)\cdot 10^{19}$ cm^{-3} ergeben sich geringe spezifische Kontaktwiderstände kleiner 4 mΩcm^2 für siebgedruckte und gefeuerte Metallkontakte. Erstmalig wird experimentell gezeigt, dass der tiefenabhängige Verlauf der Dotierung zu einer niederohmigen Kontaktausbildung beiträgt. Diese Korrelation wird auch anhand eines analytischen Modells, welches auf Metallkristalliten beruht, demonstriert. Des Weiteren wird gezeigt, dass die Ladungsträgerrekombination unterhalb der Metallkontakte sowohl mit den Metallkristalliten als auch mit der Tiefe der Bor-Dotierprofile korreliert.

Die Fortschritte in der Emitterausbildung und das verbesserte Verständnis metallisierungsbedingter Fragestellungen sind auch für andere Solarzellentypen von besonderem Interesse. Erkenntnisse aus dieser Arbeit trugen auch grundlegend zur Weiterentwicklung der MWT-Solarzellentechnologie auf p-dotierten Substraten bei.

Table of Contents