

Cost-efficient High-throughput Ion-Implantation for Photovoltaics - CHIP

J. Krügener¹, R. Peibst², E. Bugiel¹, F. Kiefer², R. Brendel^{2,*}, H. Jörg Osten^{1,*}

¹Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik, Leibniz Universität Hannover, Schneiderberg 32, D-30167 Hannover; ²Institut für Solarenergieforschung Hameln, Am Ohrberg 1, D-31860 Emmerthal; *Laboratorium für Nano- und Quantenengineering, Schneiderberg 39, 30167 Hannover

Über das Projekt

Die aktuelle Entwicklung von kristallinen Siliziumsolarzellen ist gekennzeichnet durch die Reduktion der Herstellungskosten einerseits und die sukzessive Erhöhung des Zellwirkungsgrades andererseits, so dass insgesamt die Kosten pro Watt Peak verringert werden können und die Photovoltaik gegenüber anderen alternativen Energieformen sowie gegenüber fossilen Energieträgern konkurrenzfähig wird [1].

Zur Steigerung des Wirkungsgrades gehen die meisten Hersteller einen evolutionären Weg, der zunächst die Weiterentwicklung des bisherigen Standardzellkonzeptes – beidseitig kontaktierte p-Typ-Solarzelle mit n-Typ-Vorderseitenemitter (Abb. 1a) - verfolgt, aber in mittlerer Zukunft auch zu einer Änderungen des Zellkonzeptes führen wird. Eine wichtige Weiterentwicklung der heute üblichen „Standardzelle“ ist die Passivierung der Zellerückseite. Die führt zum einen zu verbesserten optischen Eigenschaften und zum anderen zu geringeren Rekombinationsverlusten der Solarzellen. In den bei heutigen Standardzellen verwendeten p-Typ-Basismaterial, das mit dem Czochralski-Verfahren gewonnen wird und daher einen signifikanten Sauerstoffanteil aufweist, findet unter Beleuchtung die Bildung von rekombinationsaktiven Bor-Sauerstoffkomplexen statt, wodurch die Zelleistung mit der Zeit abnimmt., verhindert werden kann diese Degradation durch den Wechsel zu n-Typ Basismaterial. Ein typisches Zellkonzept mit n-Typ-Basismaterial sind so genannte PERT-Zellen (Passivated Emitter and Rear, Totally doped) wie in Abbildung 1b schematisch skizziert.

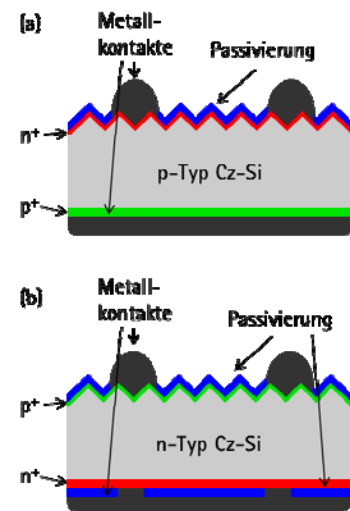


Abbildung 1. Schematische Zellquerschnitte für (a) "Standardzellen" und (b) PERT-Zellen.

Der Wechsel hin zu n-Typ-Basismaterial erfordert jedoch einseitig wirkende Verfahren zur p-Typ Dotierung der einen und zur n-Typ Dotierung der anderen Zellseite. Basierend auf dem heute in der industriellen Solarzellenproduktion überwiegend eingesetzten Diffusionsverfahren, bei dem eine Vorbelegung des Wafers mit Phosphor- (bzw. Bor-) glas erfolgt und danach in einem Ofen-Hochtemperaturschritt der Phosphor (bzw. das Bor) in den Siliziumwafer diffundiert wird, impliziert die Erzeugung von einseitigen Dotierungen viele Prozessschritte und ist somit sehr teuer.

Eine interessante Alternative hierfür ist die Dotiertechnik der Ionenimplantation, die die Mikroelektronik seit mehreren Jahrzehnten zur Dotierung verwendet. Hierbei werden die Dotieratome (z.B. Phosphor und Bor) in einer Ionenquelle ionisiert, mittels eines elektrischen Feldes auf mehrere Kiloelektronenvolt beschleunigt und in den Wafer implantiert. Die Kristallschäden werden in einem nachfolgenden Hochtemperaturschritt mittels Rapid Thermal Processing (RTP) weitestgehend ausgeheilt und die Dotieratome aktiviert, d.h. in reguläre Kristallgitterplätze eingebaut.

Auch wenn die Ionenimplantation heute in der Mikroelektronik die vorherrschende Dotiermethode ist, so konnte sie sich bisher in der Photovoltaik nicht etablieren. Ein wichtiger Punkt, die Prozesskosten, werden maßgeblich durch den Zelldurchsatz bestimmt. Seit wenigen Jahren gibt es jedoch immer mehr Geräte, mit denen hohe Durchsätze bei geringen Kosten pro Prozess möglich sind. Der zweite Punkt ist die Ausheilung nach der Implantation. Die durch die Implantation entstehenden Kristalldefekte führen zu stark erhöhten Verlusten durch Rekombination in der späteren Solarzelle. Eine Verringerung der Kristalldefekte ist nur über, im vergleich zur Mikroelektronik, deutlich längere (teuere) Ausheilprozesse möglich.

Grundlegendes Ziel des CHIP-Projektes ist es, die Ionen-Implantation für die Herstellung von industrienahen Silizium-Solarzellen zu evaluieren. Hierzu ist Grundlagenforschung zu den Mechanismen der Ausheilprozesse der Kristallschäden notwendig, um einerseits exzellente Bauelementcharakteristiken zu erhalten, andererseits die dafür notwendige Prozesszeit zu minimieren und die Prozesse so wirtschaftlich zu gestalten. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen für die Herstellung der in Abbildung 1b skizzierten n-Typ PERT Solarzelle angewendet werden.

Auszug der bisher erzielten Ergebnisse

Im Folgenden werden Ergebnisse im Zusammenhang mit der Implantation von elementarem Bor und der anschließenden Ausheilung dargestellt. Schwerere Atome, z.B. Phosphor führen bereits ab relativ geringen Ionendosen zu einer Amorphisierung der Siliziumoberfläche. Während der Ausheilung rekristallisiert diese amorphe Schicht und die Dotieratome werden in Si-Gitterplätze eingebaut, wodurch sie „elektrisch aktiv“ werden. Hierzu werden vergleichsweise geringe Temperaturen ($\sim 850^\circ\text{C}$) benötigt. Abbildung 2a zeigt eine TEM-Querschnittsaufnahme nach der Implantation von Phosphor und der anschließenden Ausheilung, wobei keine implantationsinduzierten Defekte mehr sichtbar sind.

Im Vergleich hierzu, weist die Implantation mit Bor eine Besonderheit auf. Bei der Implantation entstehen viele Punktdefekte (Si-Zwischengitteratome), deren Auflösung deutlich höhere thermische Budgets erfordern als das z.B. nach der P-Implantation der Fall ist. Diese Punktdefekte agglomerieren bei der Ausheilung zur Ausbildung zu „ausgedehnten“ Kristalldefekten, wobei bei Temperaturen oberhalb von 1000°C sogenannte Versetzungsschleifen die Defektpopulation dominieren. Abbildung 2b zeigt eine TEM-„plan view“-Aufnahme nach der Implantation von Bor und unvollständiger Ausheilung. Es ist deutlich zu erkennen, dass noch viele Defekte nach der Ausheilung vorhanden sind. Diese würden in der Solarzelle zu signifikanten Rekombinationsverlusten führen.

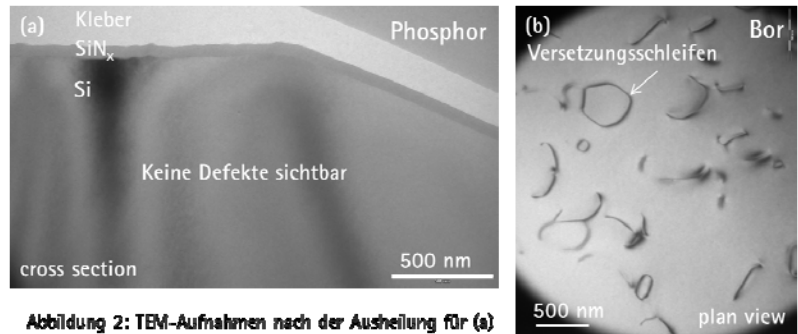


Abbildung 2: TEM-Aufnahmen nach der Ausheilung für (a) Phosphor und (b) für Bor

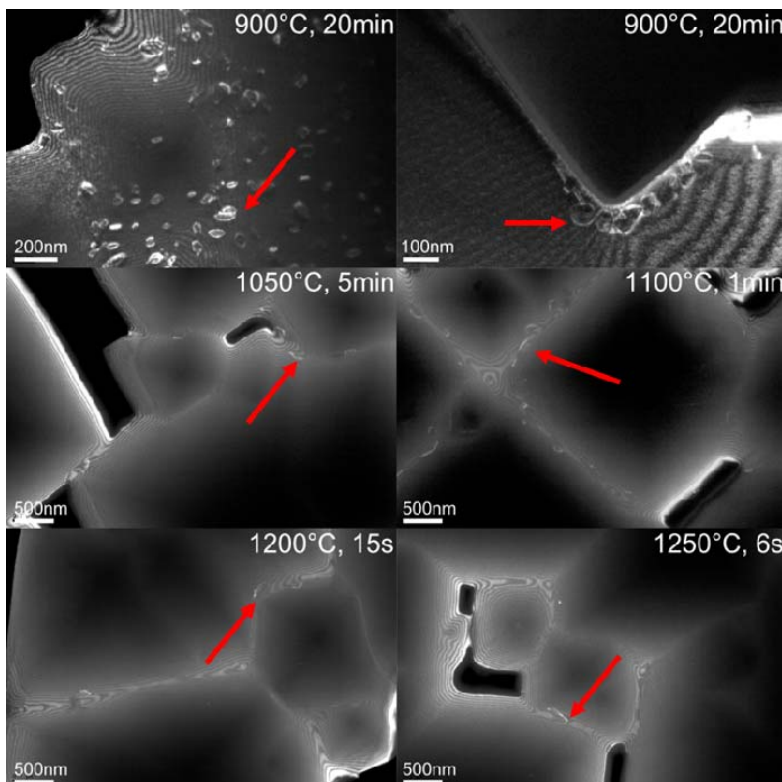


Abbildung 3. TEM plan view und cross section Aufnahmen unter Dunkelfeld und "weak beam"-Bedingungen nach der Implantation von Bor und anschließender Ausheilung. Die verwendeten thermischen Budgets sind in den jeweiligen Bildern vermerkt. Der Graph oben rechts zeigt den Vergleich der gemessenen und der simulierten Defektdichten.

Wirkungsgraden von über 21 % angestrebt. (Zum Vergleich: die besten derzeit produzierten p-Typ-Standard solarzellen haben nach Lichtdegradation einen Wirkungsgrad von $\sim 19\%$).

Danksagung

Das CHIP-Projekt wird gefördert vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMU) unter der Vertragsnummer 0325480C.

#

#####

¹ International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 2013 edition, www.itrpv.net

² J. Krügener, F.A. Wolf, R. Peibst, F. Kiefer, C. Schöllhorn, A. Grohe, R. Brendel, and H.J. Osten, presented at the 23rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-23), Taipeh, Taiwan, 2013

³ F. Kiefer, R. Peibst, T. Ohrdes, T. Dullweber, J. Krügener, H.J. Osten, C. Schöllhorn, A. Grohe, and R. Brendel, presented at the 23rd International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-23), Taipeh, Taiwan, 2013#

#