

Johannes G. Laven

Protonendotierung von Silizium

Untersuchung und Modellierung
protoneninduzierter
Dotierungsprofile in Silizium



Springer Vieweg

Protonendotierung von Silizium

Johannes G. Laven

Protonendotierung von Silizium

Untersuchung und Modellierung
protoneninduzierter
Dotierungsprofile in Silizium

Mit einem Geleitwort von
Prof. Dr. Lothar Frey und Dr. Hans-Joachim Schulze

Johannes G. Laven
Erlangen, Deutschland

Die vorliegende Arbeit wurde am 11. September 2013 als Dissertation an der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg verteidigt (Tag der Einreichung: 10. Dezember 2012).

Dekanin der Technischen Fakultät: Prof. Dr.-Ing. Marion Merklein
Vorsitzender des Prüfungskollegiums: Prof. Dr.-Ing. Jörn Thielecke
Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. Lothar Frey und Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Job

ISBN 978-3-658-07389-3

ISBN 978-3-658-07390-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-07390-9

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Geleitwort

In seiner Arbeit widmet sich Johannes Laven der Untersuchung und Modellierung von protoneninduzierten Dotierungsprofilen in kristallinem Silizium. Er untersucht die Einflüsse der Parameter der Protonenimplantation und der anschließenden Temperung auf die resultierenden Dotierungsprofile detailliert. Neben der Bildung der protoneninduzierten Dotierungsprofile befasst sich Johannes Laven außerdem mit tiefen Störstellen, die durch die Protonendotierung hervorgerufen werden. Er gibt überdies einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Literatur zu diesem Thema.

Die Methode, in kristallinem Silizium mittels einer hochenergetischen Protonenbestrahlung eine n-dotierte Schicht zu erzeugen, hebt sich wesentlich von konventionellen Dotierungsverfahren ab. Durch die große Eindringtiefe der Protonen erlaubt dieses Verfahren Dotierungsprofile in Tiefen jenseits von 100 μm zu erzeugen. Zugleich sind die hierfür erforderlichen Aktivierungstemperaturen mit weniger als 500 °C vergleichsweise gering. Diese Eigenheiten erlauben Prozesse, die mit konventionellen Dotierungsverfahren nicht realisierbar wären. Diese Vorteile machen die Protonendotierung insbesondere für Optimierungsprozesse von Leistungshalbleiterbauelementen, mit ihren ausgedehnten und niedrig dotierten Driftzonen, sehr interessant.

Obgleich die Protonendotierung im Grundsatz seit Dekaden bekannt ist, fehlt in der Fachwelt nach wie vor eine mikroskopische Beschreibung des der Protonendotierung zugrundeliegenden Defektes. Ferner fehlte es bislang an einem ausreichenden Verständnis, um die Protonendotierung adäquat vorherzusagen. Johannes Laven schließt die

Lücke der fehlenden Vorhersagbarkeit, in dem er ein auf einer Vielzahl eigener experimenteller Daten beruhendes Modell erarbeitet. Mit seinem Modell gelingt es ihm, trotz der weiterhin fehlenden mikroskopischen Beschreibung der Donatoren, erstmalig die Bildung von Protonen-induzierten Dotierungsprofilen wiederzugeben.

Erlangen

Prof. Dr. Lothar Frey
Dr. Hans-Joachim Schulze

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand größtenteils während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente an der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg. Die abschließende Ausarbeitung einiger Teile, insbesondere des Kapitels 5, erstreckte sich jedoch noch weit über meine Zeit in Erlangen hinaus. In dieser letzten Phase stellte der Abschluss meiner Dissertation für mich eine nennenswerte Doppelbelastung dar, welche zusätzlich zu verplanten Wochenenden unzählige frühe Frühschichten und späte Spätschichten (unglücklicherweise zumeist jeweils an ein und demselben Tag) bedingte. Neben der persönlichen Bereicherung, die mir die Promotion an sich schon bot, war besonders die Herausforderung dieser letzten Phase, aller Opfer zum Trotz, eine sehr lehrreiche und mitunter positive Erfahrung für mich.

Von der Probenherstellung am Hochenergieimplanter, Entwurf und Realisierung von Messstrukturen in einer CMOS-Linie, über die verschiedenen Messungen und Auswertungen, bis hin zur Modellbildung und Simulation bot mir diese Arbeit die Gelegenheit, meine Proben und Daten auf sämtlichen Schritten selbst zu begleiten. Hierunter fallen allerdings auch einige Pfade, die in (vermeintlichen) Sackgassen endeten und schließlich keinen Einzug in dieses Buch fanden. Hierzu gehört beispielsweise ein sehr interessanter und lehrreicher Ausflug in die Prozess- und Gerätesimulation. Trotz einzelner Fehlschläge bekam ich hierdurch unschätzbare Einblicke in eine breite Vielzahl von Arbeitsgebieten und hatte dabei die Chance, mit vielen Menschen aus unterschiedlichen Disziplinen zusammenzuarbeiten, worüber ich sehr glücklich bin.

An Motivation und Faszination an dem spannenden Thema meiner Arbeit hat es mir in der gesamten Zeit zum Glück nie (wesentlich) gemangelt. Insbesondere das Ziel, die komplexen Ergebnisse mit einem Modell beschreiben und vorhersagen zu können, hat mir selten Ruhe gelassen und mich selbst in Urlaube, auf Ausflüge und Wanderungen begleitet. Unvergessen, als durchaus schöne Erinnerung, bleibt für mich ein Sommerurlaub, in den ich einige meiner Ordner mitschleppte, alles auf dem Boden im Wohnzimmer der Ferienwohnung ausbreitete und mit geduldiger und liebenswert nachsichtiger Hilfe meiner Frau die bis dahin entstandenen Teilmodelle aneinanderreihen konnte.

Nach dem Kraftakt des Fertigstellens der Dissertation ist es eine durchaus schöne Beschäftigung mir in Erinnerung zurufen, wie viel davon ich nur durch wohlwollende Unterstützung Dritter erreichen konnte. Oder, vielleicht treffender formuliert, wo überall Hilfsbereitschaft, Aufmunterung und guter Rat zu finden waren:

Für die sehr gute Betreuung, Unterstützung und vielen Ratschläge danke ich Prof. Dr. Lothar Frey sehr. Ebenso danke ich Prof. Dr. Reinhart Job für seine große Unterstützung, Anregungen und stete Diskussionsfreude. Besonders herzlich danke ich Dr. Hans-Joachim Schulze, ohne dessen hervorragende Betreuung, seinen Wissensschatz und seine Neugierde diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Diese Arbeit ist mit Unterstützung der Infineon Technologies AG und dem ECPE e.V. entstanden. Für ihre Unterstützung und ihr Interesse danke ich Dr. Gerhard Miller und Thomas Harder.

Dr. Werner Schustereder, PD Dr. Franz-Josef Niedernostheide und Dr. Holger Schulze danke ich aufrichtig für ihr reges Interesse, ihre vielen Ideen und die tatkräftige Unterstützung meiner Arbeit. Ebenso danke ich Prof. Dr. Heiner Ryssel, Dr. Volker Häublein, Dr. Mathias Rommel sowie PD Dr. Peter Pichler für viele Diskussionen und Anregungen. Für bemerkenswert geduldige Hilfe bei der Probenherstellung, -präparation und -messung sowie für die gute Stimmung und die netten Gespräche währenddessen danke ich Guiyue Jiao, Anette Daurer und Thomas Klauser. Für ihre stete Bereitschaft Fragen zu beantworten

danke ich Dr. Ludwig Cohausz und Dr. Sieghard Weiss sehr. David Schindele und Dr. Jochen Kaiser danke ich für zahllose Gespräche und Zerstreung zwischendurch. Stefan Kirnstötter und Martin Faccinelli danke ich für viele interessante Diskussionen. Mit großer Spannung erwarte ich die noch kommenden Dissertationen von Moriz Jelinek, Stefan Kirnstötter, Max Suckert und Martin Faccinelli.

Meiner Frau Annika gilt mein herzlichster Dank für ihre unermüdliche Unterstützung, Liebe und Bestärkung. Ich entschuldige mich von Herzen für die vielen Abende, Wochenenden und Urlaubstage, die ich mit dieser Arbeit statt mit ihr verbracht habe.

Trotz der Hilfe vorgenannter Menschen wurde diese Arbeit, wie viele andere mehr, zu aller erst durch den durchaus glücklich zu nennenden Umstand einer friedlichen und stabilen Gesellschaft ermöglicht. Ich hoffe, dass uns dies noch lange erhalten bleibt.

Nach allem, was ich während meiner Arbeit gelernt habe, beeindruckt mich die beachtliche Zahl an unverständenen Fragestellungen, die alleine das vergleichsweise einfache System eines nahezu perfekten Silizium-Einkristalls auch noch nach Dekaden ausgiebiger akademischer und industrieller Forschung birgt. Diese Erkenntnis gebietet mir vor allem Demut in Anbetracht der schier endlosen Komplexität, welche die Welt und das Leben noch bereithalten.

Möge Ihnen dieses Buch eine interessante Lektüre bieten und dazu beitragen, Ihr Wissen in diesem überaus spannenden Gebiet ein klein wenig zu erweitern.

Taufkirchen

Johannes G. Laven

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
-----------------------	------

Tabellenverzeichnis	XVII
---------------------	------

1 Einleitung	1
--------------	---

2 Grundlagen der Protonendotierung	9
------------------------------------	---

2.1 Wasserstoff in Silizium.....	10
2.2 Verwendung der Protonenimplantation	15
2.3 Wasserstoffimplantationsinduzierte Donatoren	26
2.4 Implantationsphysik	37
2.5 Strahleninduzierte Defekte	49

3 Durchführung und Charakterisierungsmethoden	65
---	----

3.1 Ausbreitungswiderstandsmessungen	65
3.2 Kapazitäts-Spannungsmessungen	71
3.3 Transiente Störstellenspektroskopie.....	74
3.4 Probenpräparation	80

4 Ladungsträgerprofile und Parameterabhängigkeiten	83
--	----

4.1 Ladungsträgerbeweglichkeit in den erzeugten Profilen	84
4.2 Diffusion des implantierten Wasserstoffs	89
4.3 Einfluss der Temperung auf die Aktivierung der Profile ..	111
4.4 Einfluss der Implantationsparameter auf die Profile	130
4.5 Donatorenprofile in tiegelgezogenem Silizium.....	165

5 Strahlungsinduzierte Störstellen	183
5.1 Haftstellen in protonenbestrahltem Silizium	186
5.2 Identifikation der erzeugten Haftstellen	191
5.3 Diskussion	214
6 Modellierung	223
6.1 Zusammenfassung der analytischen Teilmodelle	224
6.2 Vergleich mit dem Experiment und Diskussion	231
7 Zusammenfassung und Ausblick	239
A Anhang	247
A.1 SRP-Referenzmessungen und Probenserien	247
A.2 Referenzmessung zum Ausfrierverhalten	250
A.3 DLTS-Messungen	251
A.4 Negative-U Defekte	268
A.5 HDProSim	271
Literaturverzeichnis	275
Eigene Veröffentlichungen	307
Kurzfassung	311
Abstract	313

Abbildungsverzeichnis

2.1	Abbremsung von Protonen in Silizium	38
2.2	Kritischer Winkel für den Eintritt in einen Kristallkanal ..	49
2.3	Profile von Primärgitterleerstellen	53
2.4	Reaktionspfade für Gitterleerstellen in Silizium.....	59
3.1	Ausbreitungswiderstands-Methode	67
3.2	Ladungsträgerbeweglichkeiten	69
3.3	Tiefenbereich von Kapazitäts-Spannungsmessungen	73
3.4	Ablauf einer Störstellenspektroskopie-Messung	75
4.1	Vergleich von Ladungsträgerkonzentrationen aus $C(U)$ - und SRP-Messungen	86
4.2	Abschätzung der Ladungsträgerbeweglichkeit nach $C(U)$ - und SRP-Messungen	88
4.3	Wasserstoff- und Gitterleerstellenverteilungen nach der Implantation	90
4.4	Ladungsträgerprofil nach einer fünfstündigen Temperung bei 350 °C	92
4.5	Konduktivitätsprofile der löcherleitenden Region in koimplantierten Proben	94
4.6	Schematische Skizze der Tiefenverteilungen der induzierten Akzeptoren und Donatoren	97
4.7	Bestimmung der effektiven Diffusionskonstanten	99
4.8	Arrhenius-Auftragung der Diffusionskonstanten in zonengeschmolzenem Silizium	103
4.9	Lage des pn -Übergangs in Koimplantierten Proben	106
4.10	Lage des pn -Übergangs für versch. Protonendosen	108

4.11 Lage des pn -Übergangs nach Protonenimplantationen mit 4 MeV	110
4.12 Änderung der Profilform der Donatorenverteilung mit der Ausheiltemperatur.....	112
4.13 Ladungsträgerkonzentration in Abhängigkeit der Ausheiltemperatur.....	115
4.14 Ladungsträgerkonzentration in Abhängigkeit der Ausheildauer um 400 °C	117
4.15 Arrhenius-Auftragung der Dissoziationszeitkonstanten um 400 °C	118
4.16 Ladungsträgerkonzentration in Abhängigkeit der Ausheildauer um 500 °C	119
4.17 Arrhenius-Auftragung der Dissoziationszeitkonstanten um 500 °C	121
4.18 Nachbildung der Aktivierungskurve.....	124
4.19 Ausfrieren der freien Ladungsträger	128
4.20 Ladungsträgerprofile nach Implantationen mit verschiedenen Protonenenergien.....	131
4.21 Halbwertsbreiten der simulierten und experimentell gemessenen Verteilungen für verschiedene Implantationsenergien.....	133
4.22 Donatorenprofile nach Temperung bei 370 °C und 470 °C..	135
4.23 Dosisabhängigkeit der maximalen Ladungsträgerkonzentrationen nach Temperungen bei 350 °C	137
4.24 Ladungsträgerprofile nach Temperungen bei 470 °C	139
4.25 Dosisabhängigkeit der maximalen Ladungsträgerkonzentrationen nach Temperungen bei 470 °C	140
4.26 Energieabhängigkeit der maximalen Ladungsträgerkonzentrationen nach Temperungen bei 470 °C	141
4.27 Dosisabhängigkeit der Donatorenspezies HD1	143
4.28 Primärdefekt- und Ladungsträgerprofile nach Koimplantation von Helium und Wasserstoff	144

4.29	Donatorenkomplexe induziert durch Koimplantation von Helium.....	146
4.30	Donatorenprofile mit und ohne Voroxidation	154
4.31	Aktivierungsprofile von protonen- und heliuminduzierten Donatoren.....	158
4.32	Skizzierte Verteilungen der Kernkomplexe der Wasserstoffdonatoren und des Wasserstoffs	162
4.33	Arrhenius-Auftragung der Diffusionskonstanten in zonengeschmolzenem und tiegelgezogenem Silizium	166
4.34	Gegenüberstellung von Ladungsträgerprofilen in verschiedenen Grundmaterialien	167
4.35	Ladungsträgerkonzentrationen in tiegelgezogenem Silizium in Abhängigkeit der Protonendosis.....	169
4.36	Korrigiertes Ladungsträgerprofil in tiegelgez. Silizium	171
4.37	Ausheiltemperaturabhängigkeit der zusätzlichen Donatoren in tiegelgezogenem Silizium	172
4.38	Ladungsträgerprofile nach einer zusätzlichen Temperung bei 400 °C	181
5.1	DLTS-Spektren für unterschiedliche Ausheiltemperaturen .	187
5.2	Lage der Niveaus im verbotenen Band	189
5.3	Arrhenius-Darstellung der tiefen Haftstellen	190
5.4	Dosisabhängigkeit erzeugter Haftstellen	196
5.5	Tiefenprofile der beobachteten Haftstellen	197
5.6	DLTS-Spektren in unterschiedlichen Substraten	217
5.7	DLTS-Spektren nach unterschiedlichen Füllimpulslängen..	219
6.1	Umwandlung von Primärdefektprofilen in die HD-Vorläuferspezies.....	226
6.2	Thermischer Zerfall der HD-Vorläuferspezies	227
6.3	Errechnete Wasserstoff- und HD-Verteilung.....	230
6.4	Gegenüberstellung von experimentellen und simulierten Ladungsträgerprofilen	232
6.5	Simulierte HD-Verteilung mit zusätzlicher Passivierung ...	235

A.1	Messungen zur Bestimmung des Fehlers der verwandten SRP-Messungen	247
A.2	Ladungsträgerprofile nach unterschiedlichen Implantationstemperaturen	248
A.3	$C(U)$ -Referenzmessungen zum Ausfrierverhalten freier Ladungsträger	250
A.4	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle A	253
A.5	Arrhenius-Auftragung der Haftstellen B1 und B2	254
A.6	Arrhenius-Auftragung der Haftstellen C1, C2 und C3	255
A.7	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle D	256
A.8	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle E	257
A.9	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle F	258
A.10	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle G	259
A.11	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle H	260
A.12	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle I	261
A.13	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle K	262
A.14	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle L	263
A.15	Arrhenius-Auftragung der Haftstellen M1 und M2	264
A.16	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle P	265
A.17	Arrhenius-Auftragung der Haftstelle S	266
A.18	DLTS-Spektrum einer unimplantierten Referenzprobe	267
A.19	Skizzierte Energieniveaus eines <i>negative-U</i> Defektes	268

Tabellenverzeichnis

2.1	Tempertemperaturbereich und Ionisationsenergien von Wasserstoffdonatorenkomplexen.....	31
4.1	Effektive Diffusionskonstanten des implantierten Wasserstoffs	100
5.1	Energieniveaus und Wirkungsquerschnitte von Protoneninduzierten Haftstellen.....	215
A.1	Implantations- und Grundmaterialparameter der verwendeten Probenreihen	249
A.2	Implantations- und Ausheilparameter Versuchsserie S10 ...	252

1 Einleitung

You can't possibly be a scientist if you
mind people thinking that you're a fool.

Douglas Adams
So long and thanks for all the fish

Die Bestrahlung von Silizium mit Protonen ist ein bekanntes Werkzeug bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen. Neben der verbreiteten Anwendung zur lokalen Einstellung der Ladungsträgerlebensdauer bieten Protonenimplantationen die Möglichkeit eine Elektronendotierung zu erzeugen. Dabei wirken bis etwa 500 °C stabile strahleninduzierte Sekundärdefekte nach ihrer Dekoration mit Wasserstoff als flache Donatordefekte mit Ionisationsenergien im Bereich von einigen 10 meV bis etwa 100 meV.

In den notwendigerweise niedrig dotierten Driftregionen von Leistungshalbleiterbauelementen ist es oftmals wünschenswert ein kontrolliertes Dotierstoffprofil einzubringen. Durch eine Einstellbarkeit der vertikalen Dotierstoffverteilung in einem Bauelement ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten zur Optimierung dessen statischen wie dynamischen Verhaltens. Zur Aufnahme hoher Sperrspannungen müssen Leistungshalbleiterbauelemente Dicken ihrer aktiven Region von, je nach Spannungsklasse, deutlich über 100 µm aufweisen. Zur gezielten Dotierung derartig dicker Substrate mit klassischen Donatoren wie Phosphor oder Arsen aus einer oberflächennahen Quelle wären sehr lange Diffusionszeiten bei hohen Temperaturen notwendig. Aufgrund der teils gravierenden Auswirkungen von Kontaminationen auf die

Herstellungsausbeute ist hingegen ein möglichst minimales thermisches Budget bei der Herstellung erwünscht. Zudem ist die vertikale Verteilung eines eindiffundierten Dopanden nur mit wenigen Freiheitsgraden kontrollierbar. Alternativ zu einer Eindiffusion kann prinzipiell eine Implantation der Dotierstoffe in das Bauelement erfolgen. Zur Implantation von Phosphor in Tiefen von über $10\text{ }\mu\text{m}$ in Silizium wären jedoch bereits Ionenenergien von etwa 30 MeV notwendig. Derartige Höchstenergieimplantationen sind in technischem Maßstab kaum zu realisieren. Mit der vergleichsweise hohen Eindringtiefe von Protonen bietet die Dotierung mittels Protonenimplantation hierbei deutliche Vorteile gegenüber der Dotierung mit klassischen Donatoren wie Phosphor oder Arsen. So erreichen Protonen mit einer Energie von 700 keV bereits eine Eindringtiefe von etwa $10\text{ }\mu\text{m}$. Das von den Protonen induzierte Donatorenprofil weist dabei eine durch die Abbremsmechanismen im bestrahlten Silizium gegebene charakteristische Form mit einem ausgeprägten Maximum nahe der maximalen Eindringtiefe der Protonen auf. Zudem wird das zur Herstellung eines Leistungshalbleiterbauelements notwendige thermische Budget aufgrund der geringen Aktivierungstemperaturen der Wasserstoffdonatorenprofile nur minimal erhöht.

Für die Entwicklung von Bauelementen, bei deren Herstellung auf die Vorteile der Dotierung durch Protonenimplantationen zurückgegriffen werden soll, ist ein möglichst gutes Verständnis der Abhängigkeiten des Donatorenprofils von sämtlichen Einflussparametern wichtig. Obgleich die dotierende Wirkung der Protonenbestrahlung in Silizium bereits seit 40 Jahren bekannt ist [1], fehlen bislang entscheidende Informationen, um durch Protonenbestrahlung erzeugte Donatorenprofile in quantitativer Weise vorhersagen zu können. So ist aus der Literatur zwar hinreichend bekannt, dass die Wasserstoffdonatoren aus wasserstoffdekorierten Strahlendefektkomplexen bestehen, zudem ist die Entstehung von Primärdefekten während einer Protonenbestrahlung gut vorhersagbar, es fehlen jedoch Untersuchungen zur Umwandlungseffizienz der Primärschäden in Wasserstoffdonatoren. Die Abhängigkeiten dieser Umwandlungseffizienz von den relevanten

Implantations- und Ausheilparametern sind bislang nicht untersucht, aber wesentlich für eine Vorhersage der Wasserstoffdonatorenprofilen.

Die untersuchten Wasserstoffdonatorenkomplexe bestehen aus einem wasserstoffdekoriertem Komplex aus strahleninduzierten Kristalldefekten. Die Ausbildung des Dotierstoffprofils unterscheidet sich daher prinzipiell von der Aktivierung klassischer substitutioneller Dopanden. Für die Ausbildung der Wasserstoffdonatorenprofile nach einer hochenergetischen Protonenimplantation ist die Überlagerung der Defekt- und Wasserstoffprofile maßgebend. Dabei unterscheiden sich die Profile des implantierten Wasserstoffs und der bei der Implantation erzeugten Strahlenschäden nach Protonenimplantationen mit Energien im Bereich von Megaelektronenvolt deutlich. Während die Strahlenschäden von der durchstrahlten Oberfläche bis zur maximalen Eindringtiefe der Protonen reichen, liegt der Wasserstoff lokalisiert um seine projizierte Reichweite mit einer Halbwertsbreite von grob 10 % der Reichweite vor. Folglich ist zur Aktivierung des protoneninduzierten Donatorenprofils ein Diffusionsschritt notwendig, bei dem der Wasserstoff bis zur durchstrahlten Oberfläche diffundieren kann. Die Diffusion von Wasserstoff in Silizium ist ein intensiv untersuchtes Thema. Die publizierten Diffusionskonstanten unterscheiden sich dabei um mehrere Größenordnungen (siehe beispielsweise in Abbildung 4.8 auf Seite 103 enthaltene Referenzen) und weisen eine empfindliche Abhängigkeit von der Konzentration intrinsischer und extrinsischer Defekte im Silizium auf. Die bislang verfügbaren Ergebnisse lassen sich nicht auf den für die Aktivierung des Wasserstoffdonatorenprofils relevanten Fall der Diffusion des implantierten Wasserstoffs durch die strahlengeschädigte Siliziumschicht anwenden.

Als wasserstoffdekorierte Punktdefektkomplexe besitzen die Wasserstoffdonatorenkomplexe eine begrenzte thermische Stabilität und verhalten sich somit fundamental anders als substitutionelle Dopanden, die bei jeder Temperatur eine gewisse Wahrscheinlichkeit haben, einen Gitterplatz zu besetzen. Bei einer Überschreitung ihrer thermischen Stabilität dissoziieren die Wasserstoffdonatorenkomplexe, wobei die

beteiligten Punktdefekte freigesetzt werden. Ein einmal dissoziierter Defektkomplex zerfällt daher dauerhaft und kann nicht erneut gebildet werden. Die verfügbaren Untersuchungen zur thermischen Stabilität der ausgebildeten Wasserstoffdonatorenprofile in der Literatur beschränken sich auf die Angabe von Temperaturbereichen, innerhalb derer die Wasserstoffdonatorenkomplexe nachgewiesen werden (siehe hierzu beispielsweise Referenzen [2–7], sowie in Tabelle 2.1 auf Seite 31 genannte Quellen). Dabei basieren die Ergebnisse in den bislang publizierten Arbeiten auf isochronalen Ausheilserien, aus denen die zur Untersuchung der Dissoziation der Donatoren notwendigen Zeitkonstanten bei jeweils festen Ausheiltemperaturen nicht zugänglich sind. Zur Definition eines thermischen Budgets für die technische Anwendung der protoneninduzierten Donatorenkomplexe ist jedoch das Verständnis deren Dissoziationskinetik unumgänglich.

Neben der, durch die Ausheilparameter Zeit und Temperatur bestimmten, Aktivierung und Dissoziation der Wasserstoffdonatoren ist die Bildung der Wasserstoffdonatorenprofile aus dem implantierten Wasserstoff und den erzeugten Strahlenschäden abhängig von den Implantationsparametern Dosis und Energie. Die absolute Wandlungseffizienz der induzierten Strahlenschäden in Wasserstoffdonatorenkomplexe liegt dabei im Promillebereich [8]. Zum Einfluss der Protonendosis auf die gebildete Donatorenkonzentration gibt es in der publizierten Literatur widersprüchliche Angaben (vergleiche hierzu beispielsweise Referenzen [7, 9–11]). Dabei ist eine Konzentrationsabhängigkeit der Bildungseffizienz spezieller Defektkomplexe aufgrund der vielfältigen Reaktionsmöglichkeiten der strahleninduzierten Punktdefekte untereinander durchaus zu erwarten. Trotz einiger Untersuchungsergebnisse zu diesem Thema findet sich bislang keine Angabe der tatsächlichen Wandlungseffizienz von Strahlenschäden in Wasserstoffdonatoren oder eine Untersuchung deren Abhängigkeiten von der Absolutkonzentration der Strahlenschäden oder des Wasserstoffs.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Lücken im Verständnis der Parameterabhängigkeiten der Protonendotierung zu schließen und eine analytische Beschreibung der Parameterabhängigkeiten des Was-

serstoffdonatorenprofils zu liefern. Hierzu wurden Proben gemäß einer Versuchsmatrix, die primär die vier zentralen Prozessparameter Protonendosis und -energie sowie Ausheiltemperatur und -zeit umfasst, hergestellt. Dabei wurden auch wechselseitige Abhängigkeiten des Einflusses der Parameter auf die erzeugten Profile untereinander untersucht. In der benutzten Versuchsmatrix wurden die Parameter, je nach Komplexität der einfachen oder wechselseitigen Abhängigkeiten, in bis zu über 10 Schritten aufgelöst. Zusätzlich zu den zentralen Prozessparametern wurde auch der Einfluss der Implantationstemperatur, der Ionensorte sowie des verwendeten Grundmaterials auf das erzeugte Wasserstoffdonatorenprofil untersucht. Aus den so gewonnenen umfangreichen Daten zu den jeweiligen Einflussgrößen wird in der vorliegenden Arbeit jeweils deren Einfluss auf die erzeugte Donatorenverteilung sowie eventuell auf den Einfluss weiterer Parameter dargestellt.

Die Entwicklung moderner Halbleiterbauelemente basiert aktuell in weiten Teilen auf verlässlichen Prozesssimulationen. Hierbei wird jeder technisch relevante Einzelschritt des Herstellungsprozess eines Halbleiterbauelements mittels eines Modells abgebildet und einzeln nachvollzogen. Dabei wird als Ausgangszustand jeweils das errechnete Ergebnis des vorhergehenden Schrittes verwandt. Die so erhaltene Bauelementestruktur lässt sich im Anschluss an die Prozesssimulation in einer entsprechenden Gerätesimulation auf ihr gewünschtes Verhalten hin untersuchen. Durch entsprechende Iterationen dieser simulativen Methoden lassen sich Teile einer Entwicklung neuer Halbleiterbauelemente bereits ohne langwierige reale Prozesse ausführen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll das Verständnis der einzelnen Parameterabhängigkeiten der Wasserstoffdonatorenprofile soweit vorangebracht werden, dass sich hieraus ein analytisches Modell zu deren Vorhersage erstellen lässt, womit eine valide Prozesssimulation der Protonendotierung ermöglicht werden soll.

Das nachfolgende Kapitel 2 gibt dem Leser zunächst einen Überblick über das Verhalten von Wasserstoff in kristallinem Silizium sowie über die technische Verwendung der Protonenimplantation. Anschließend

fasst das Kapitel den aktuellen Stand der Literatur zu wasserstoffkorrelierten Donatoren zusammen. Das Kapitel beschreibt ferner den physikalischen Prozess der (Leicht-) Ionenimplantation, wie er zum Verständnis der Bildung des für die hier untersuchte Dotierungsmethode elementaren Kristalldefektprofils notwendig ist. Abschließend wird die Evolution des bei einer Bestrahlung erzeugten Kristallschadens und die Bildung von Sekundärdefekten hieraus dargestellt.

In Kapitel 3 werden die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Charakterisierungsmethoden sowie die Herstellung der verwandten Proben knapp vorgestellt.

Kapitel 4 präsentiert und diskutiert die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen experimentellen Ergebnisse zu den protoneninduzierten Ladungsträgerprofilen und deren Parameterabhängigkeiten. Dazu wird zunächst die Gültigkeit der hauptsächlich verwandten Ausbreitungswiderstands-Methode an den Wasserstoffdonatorenprofilen geprüft. Im Folgenden wird hier die Diffusion des implantierten Wasserstoffs durch die durchstrahlte Schicht und damit das Ausbreiten des Wasserstoffdonatorenprofils nach einer Protonenimplantation behandelt. Anschließend wird die Dissoziation der Wasserstoffdonatorenkomplexe untersucht. Dabei werden zwei Donatorenspezies mit unterschiedlicher thermischer Stabilität eingeführt. Weiterhin wird der Einfluss der Implantationsparameter Protonendosis und -energie auf die erzeugten Dotierstoffprofile untersucht. Dabei stellt sich ein prinzipieller Unterschied zwischen den Dosisabhängigkeiten der beiden Donatorenspezies heraus. Schließlich wird der Einfluss des verwandten Grundmaterials auf die erzeugten Donatorenprofile behandelt. Die Diskussion der präsentierten Ergebnisse erfolgt jeweils direkt im Anschluß an den jeweiligen Abschnitt.

Die verbreitete Verwendung der Protonenimplantation zur Einstellung der Ladungsträgerlebensdauer rührt von ihrer Fähigkeit zur Erzeugung von Rekombinationsniveaus in der bestrahlten Siliziumschicht her. Obgleich die zur Aktivierung der protoneninduzierten Ladungsträgerprofile hier verwandten Ausheiltemperaturen mit mindestens

350 °C weit über dem üblicherweise für Lebensdauereinstellungen verwandten Temperaturbereich bis etwa 200 °C liegen, bleiben neben den Wasserstoffdonatorenkomplexen eine Vielzahl elektrisch aktiver Defekte in der bestrahlten Schicht zurück. Kapitel 5 untersucht die in der oberen Bandhälfte verbliebenen Defekte mittels transientser Störstellenspektroskopie.

Kapitel 6 fasst die in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse über die Parameterabhängigkeiten der protoneninduzierten Ladungsträgerprofile in ein analytisches Modellsystem zusammen und bietet somit erstmals die Möglichkeit, die Wasserstoffdonatorenprofile mit einer guten Übereinstimmung mit dem Experiment über einen weiten Parameterbereich vorherzusagen.

Teile aus Kapitel 2, 4 und 5 der vorliegenden Arbeit wurden bereits vorab in Referenzen [330–334, 336, 338, 341] veröffentlicht.

2 Grundlagen der Protonendotierung

Wasserstoff in Silizium wird nicht nur bei der Protonenimplantation große technische Bedeutung zugemessen. Folglich gibt es eine Vielzahl an diesbezüglichen Studien in der Literatur. Abschnitt 2.1 gibt einen Überblick über den Einfluss des Wasserstoffs auf elektrische Parameter von kristallinem Silizium sowie über dessen Migrationsverhalten. Die Implantation von Protonen hat speziell für Leistungshalbleiterbauelemente einige Anwendungsgebiete. Abschnitt 2.2 stellt einige hiervon vor, wobei bevorzugt auf Anwendungen der wasserstoffkorrelierten Donatorenkomplexe eingegangen wird. Im folgenden Abschnitt 2.3 wird ein Überblick über den aktuellen Stand der Literatur bezüglich der hier untersuchten wasserstoffkorrelierten Donatorenkomplexe gegeben. Dabei werden die Eigenschaften dieser Donatoren sowie verschiedene Möglichkeiten zu deren Erzeugung dargelegt. Für die Bildung der untersuchten Donatorenkomplexe ist eine vorhergehende Schädigung des Siliziumkristalls unerlässlich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird diese Schädigung ausschließlich durch die Implantation leichter Ionen erzeugt. In Abschnitt 2.4 wird die Abbremsung der implantierten Ionen und der hierbei stattfindende Energieübertrag auf Gitteratome des Siliziumkristalls hergeleitet. Aus diesem Verständnis ergeben sich die charakteristische Tiefenverteilung der induzierten Defekte sowie die Eindringtiefe der Ionen. Im abschließenden Abschnitt 2.5 wird die Bildung von Primärdefekten aus der bei der Implantation an den Kristall übertragenen Energie und deren Weiterreaktion zu Sekundärdefekten anhand des aktuellen Standes der Literatur erläutert.

2.1 Wasserstoff in Silizium

Wasserstoff kann durch verschiedene technische Prozesse gewollt oder ungewollt in den Siliziumkristall eingebracht werden. Im Silizium vermag der Wasserstoff die elektrischen Eigenschaften des Halbleiters auf vielfältige Weise zu beeinflussen. Dabei kann der Wasserstoff Einfluss auf die Konzentration der freien Ladungsträger nehmen sowie deren Lebensdauer verändern. Bei der Migration des Wasserstoffs durch den Siliziumkristall kann dessen Ladungszustand von Bedeutung sein. Zudem ist die Löslichkeit des Wasserstoffs stark von der Ordnung des Siliziumkristallgitters abhängig.

2.1.1 Einfluss auf die elektrischen Eigenschaften

Offene Valenzbindungen an Grenzflächen, etwa zwischen kristallinem Silizium und einer aufgewachsenen amorphen Oxidschicht, können Zustände zwischen dem Leitungs- und dem Valenzband erzeugen und somit als Rekombinations- oder Generationszentren fungieren. Hierdurch können derartige Grenzflächen einen nachteiligen Einfluss auf das Verhalten eines Halbleiterbauelementes nehmen. Wasserstoff vermag derartige offene Bindungen chemisch abzusättigen und somit elektrisch inaktiv zu machen [12]. Neben Grenzflächendefekten kann der Wasserstoff auch mit einer Vielzahl von intrinsischen und extrinsischen Defekten im Siliziumkristall wechselwirken. In der Regel geht der Wasserstoff hierbei, wie bei Grenzflächendefekten, eine chemische Bindung mit nicht vollständig abgesättigten Valenzbindungen der Kristalldefekte ein. Durch die Dekoration mit Wasserstoff werden die Lagen der Energieniveaus der Kristalldefekte verschoben, wobei sie in der Regel gänzlich aus dem verbotenen Band entfernt werden [13–16]. Aufgrund seiner Fähigkeit, eine Vielzahl von elektrisch aktiven Kristalldefekten zu passivieren, kann Wasserstoff benützt werden, um etwa in multikristallinem Silizium oder in sonstigen Siliziumsubstraten mit vergleichsweise geringer Reinheit, eine bereits vom Grundmaterial vorgegebene niedrige Ladungsträgerlebensdauer zu erhöhen. Da derartige

Passivierungen durchaus wünschenswert sein können, wird Wasserstoff oftmals gezielt während einer Temperung bei etwa 400 °C bis 500 °C unter wasserstoffhaltiger Atmosphäre, in der Regel unter Formiergas, oder aus einem Wasserstoffplasma in das Substrat eingebracht.

Wasserstoff kann in Silizium amphoterisches Verhalten zeigen, kommt also neben einem neutralen Zustand auch als Proton H^+ oder Anion H^- vor. Durch die Änderung seines Ladungszustandes ist der Wasserstoff im Stande ionische Bindungen mit ionisierten Dopanden, wie dem substitutionellem Bor [17, 18], Aluminium, Gallium oder Indium [19] sowie, in geringerem Umfang, auch mit Phosphor [20], Arsen oder Antimon [21] einzugehen. Diese ionische Bindung bewirkt eine Passivierung des jeweiligen Akzeptor- oder Donatoratoms und vermindert entsprechend die Konzentration der verfügbaren Ladungsträger. Die so gebildeten ionischen Komplexe weisen allerdings nur geringe Bindungsenergien auf [22], weswegen sie bei relativ niedrigen Temperaturen, bereits unter 150 °C, instabil werden und der kompensierende Effekt des Wasserstoffs auf die Dotierung verschwindet [17, 23].

Eine weitere Eigenschaft des Wasserstoffs ist es, die Sauerstoffdiffusion in Silizium zu fördern. In Silizium mit erhöhter Sauerstoffkonzentration bilden sich während Temperungen bei moderaten Temperaturen Sauerstoffagglomerate, die Elektronen mit geringer Ionisationsenergie an das Leitungsband abgeben können [24, 25]. Durch eine effektive Erhöhung der Sauerstoffdiffusion durch einen Paardiffusionsmechanismus mit dem Wasserstoff wird die diffusionsbegrenzte Bildung dieser thermischen Sauerstoffdonatoren signifikant gefördert [26–28].¹

2.1.2 Beweglichkeit und Vorkommen

Aufgrund des technisch relevanten Verhaltens von Wasserstoff in Silizium besteht ein begründetes Interesse, das Diffusionsverhalten

¹Die Bildung von thermischen Sauerstoffdonatoren und der mögliche Einfluss von Wasserstoff auf deren Bildung wird in Abschnitt 4.5 ab Seite 165 der vorliegenden Arbeit ausführlicher besprochen.

von Wasserstoff in Silizium zu verstehen. Entsprechend existiert zu diesem Thema eine große Zahl an experimentellen sowie theoretischen Arbeiten.

Die im Hochtemperaturbereich oberhalb von 900°C von van Wieringen und Warmoltz [29] bestimmte Diffusionskonstante des Wasserstoffs in kristallinem Silizium mit einer Aktivierungsenergie von $0,48\text{ eV}$ ist in der Literatur gut akzeptiert. Im Bereich moderater Temperaturen hingegen streuen die experimentell ermittelten Werte für die Diffusion des Wasserstoffs um etwa sechs Größenordnungen. Die ermittelten Diffusionskonstanten liegen dabei in der Regel unter oder auf der Extrapolation der Werte von van Wieringen und Warmoltz, nicht aber darüber.² Wenngleich in vielen Experimenten eine temperaturabhängige Diffusion des Wasserstoffes gemäß eines Arrhenius-Gesetzes bestätigt wird, weichen die Ergebnisse untereinander deutlich von einer einzigen Arrhenius-Geraden ab. In einigen Fällen weichen selbst die Werte innerhalb einer Arbeit von einer einzigen Arrhenius-Geraden ab [13].

Zur Messung der Migration von Wasserstoff in Silizium wurden in der Vergangenheit vielfältige Ansätze verfolgt. Im ersten publizierten Experiment zur Bestimmung der Wasserstoffdiffusionskonstante in Silizium maßen van Wieringen und Warmoltz 1956 den Gasdurchgang von Wasserstoff durch eine dünne Siliziumschicht [29]. Ichimiya und Furuichi bestimmten 1968 aus der Ausdiffusion von Tritium aus einer hiermit angereicherten Siliziumprobe eine Aktivierungsenergie von $0,57\text{ eV}$ für die Wasserstoffdiffusion im Temperaturbereich zwischen 400°C und 500°C [30]. Es folgten weitere Publikationen, die auf physikalische Messmethoden zur Bestimmung der Verteilung des Wasserstoffs zurückgriffen. So nutzten beispielsweise Johnson, Biegelsen und Moyer [31] sowie Wilson [32] Sekundärionen-Messungen oder Ji, Shi und Wang [33] sowie Fink *et al.* [34] resonante Kernreaktionen.

²In Abbildung 4.8 auf Seite 103 sind einige Diffusionskonstanten aus der Literatur übersichtlich zusammengestellt.

Die Löslichkeit von Wasserstoff in Silizium fällt bei moderaten Temperaturen jedoch rasch unter die Nachweisgrenze derartiger physikalischer Messverfahren. So extrapolieren sich die von van Wieringen und Warmoltz [29] und von Binns *et al.* [35] bestimmten Wasserstofflöslichkeiten in Silizium in dem Bereich moderater Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 800 °C auf Werte unterhalb von 10^{10} cm^{-3} . Eine geringere Nachweisgrenze versprechen indirekte elektronische Messungen der Wasserstoffverteilung, die sich die zuvor besprochenen Eigenschaften des Wasserstoffs zunutze machen, die elektrischen Eigenschaften des Siliziums zu beeinflussen. Die Passivierung von flachen Dopanden etwa lässt sich unter anderem mittels Kapazitäts-Spannungsmessungen, wie sie zum Beispiel Tavendale, Alexiev und Williams [36] sowie Schmalz und Tittelbach-Helmrich [37] nutzten, oder mit Ausbreitungswiderstandsmessungen, unter anderen angewandt von Mogro-Campero, Love und Schubert [38] sowie Pankove, Magee und Wance [39], profilieren. Letztere Methode ermöglicht eine Profilmessung bis in den Bereich von Millimetern. Die verstärkte Bildung von thermischen Sauerstoffdonatoren erlaubt einen anderen, vergleichsweise neuartigen und mit wenig Aufwand verbundenen Ansatz, die Wasserstoffdiffusion wiederum durch Ausbreitungswiderstandsmessungen zu bestimmen [40–42]. Hierbei liegt die Nachweisgrenze für Wasserstoff, je nach Temperaturbereich [43], bei extrem niedrigen Konzentrationen bis hinab zu 10^8 cm^{-3} [44].

Die starke Streuung der Diffusionskonstanten des Wasserstoffs über mehrere Größenordnungen in der publizierten Literatur ist auf die ausgeprägte Empfindlichkeit der Wasserstoffmigration auf das Siliziumsubstrat zurückzuführen. So tritt ein deutlicher Unterschied zwischen der Diffusion von Wasserstoff in elektronenleitendem Silizium und in löcherleitendem Silizium auf [39, 45, 46]. Dieser Unterschied ist auf das amphoterische Verhalten des Wasserstoffs zurückzuführen, nach dem der Wasserstoff in Abhängigkeit der Lage des Fermi-niveaus in unterschiedlichen Ladungszuständen auftreten kann. Ein Nachweis der Beteiligung geladener Spezies an der Wasserstoffdiffusion lässt sich über den Einfluss eines elektrischen Felds führen. So zeigen

beispielsweise Tavendale, Alexiev und Williams [36] einen Einfluss des elektrischen Feldes auf die Migration von H^+ in Diodenstrukturen und Huang *et al.* [47] in unstrukturiertem Silizium mittels eines externen elektrischen Feldes. Johnson und Herring [48] beobachten eine Umwandlung von relativ mobilem H^+ in H_2^0 beim Durchlaufen eines *pn*-Übergangs aufgrund der lokal veränderten Majoritätenspezies. Capizzi und Mittiga [49] erklären experimentelle Messungen von diffundiertem Wasserstoff in den Arbeiten von Johnson [50] sowie Pankove, Magee und Wance [39] mit der simultanen Beteiligung einer positiv geladenen und einer neutralen diffundierenden Spezies. Je nach Ladungszustand ist die energetisch günstigste Lage des Wasserstoffs im Siliziumkristallgitter eine andere, wodurch sich auch die Migrationsbarriere der Spezies nach theoretischen Untersuchungen unterscheidet [51–53]. Während die negative Wasserstoffspezies H^- bevorzugt zwischen zwei benachbarten Siliziumatomen vorkommt, sind für die neutrale H^0 und die positive H^+ -Spezies tetraedrisch koordinierte Zwischengitterplätze energetisch günstiger [54]. Neben dem Vorkommen in verschiedenen Ladungszuständen findet sich der Wasserstoff im Silizium bevorzugt als elektrisch inaktives Dimer [55–57]. Die Wahrscheinlichkeit des Wasserstoffs als Dimer im Silizium vorzukommen ist eine starke Funktion seiner Konzentration. Dabei liegt der Wasserstoff in molekularer Form, als H_2 , oder als metastabiler Komplex aus einem Wasserstoff auf einem tetraedrisch koordinierten Zwischengitterplatz und einem zweiten zwischen zwei regulären Gitterplätzen vor [22, 58]. Die Migrationsbarriere der Wasserstoffdimere liegt dabei deutlich über der der Monomere [22, 59].

Störstellen im Siliziumgitter, wie sie beispielsweise in der vorliegenden Arbeit aufgrund der induzierten Strahlenschäden auftreten, vermögen die lokale Löslichkeit des Wasserstoffs deutlich zu erhöhen [38, 60], wodurch auch die Migration des Wasserstoffs beeinflusst wird. In protonenimplantierten Proben befindet sich der Wasserstoff nach Diffusionsschritten im Temperaturbereich bis etwa 550 °C nur in der strahlengeschädigten Schicht in Konzentrationen oberhalb der Detektionsgrenze von Sekundärionen-Messungen [3, 32, 34]. Die Verteilung

des Wasserstoffs ist dabei gut mit der errechneten Tiefenverteilung des Schadens korreliert [7] und die beobachtete Ausdiffusion des Wasserstoffs in mehreren Stufen lässt sich mit dem Ausheilen des Schadens in Verbindung bringen [32]. Zudem zeigen Antonova *et al.* [61] in einem Eindiffusionsexperiment, dass Wasserstoff nur in eine zuvor per Neutronenbestrahlung geschädigte Probe eindringt. Ji, Shi und Wang [33] zeigen, dass sich implantierter Wasserstoff nach einem Migrationsschritt auch in Schichten sammelt, die durch eine zusätzliche Implantation von Argonionen erzeugt wurden und vor der Temperung folglich kein Wasserstoff enthielten. Srikanth und Ashok [62], Ma *et al.* [63] sowie Huang *et al.* [64] zeigen, dass eine mit Argonionen beziehungsweise mit einem Wasserstoffplasma erzeugte, vergrabene Defektschicht durch den Wasserstoffefang effektiv als Diffusionsbarriere für diesen fungiert. Ulyashin *et al.* [65] allerdings weisen nach, dass eine solche Schadensschicht für die geringe Menge Wasserstoff, die zur geförderten Bildung thermischer Sauerstoffdonatoren benötigt wird, keine ausreichende Barriere darstellt. Eine vergrabene Defektschicht mit erhöhtem Wasserstoffgehalt, wie sie durch eine Argonionenimplantation mit anschließender Wasserstoff eindiffusion aus einem Plasma erzeugt werden kann, wirkt bei einer späteren Anhebung der Substrattemperatur, bei der die Löslichkeit im ungeschädigten Teil des Kristalls zunimmt, als Wasserstoffquelle [62].

2.2 Verwendung der Protonenimplantation

Die Implantation von Protonen in Silizium findet mehrere Anwendungen, die sich nach der implantierten Dosis ordnen lassen. Niedrige Protonendosen zwischen etwa $10^9 \text{ p}^+ \text{cm}^{-2}$ und $10^{13} \text{ p}^+ \text{cm}^{-2}$ gefolgt von Temperungen bis etwa 200°C werden zur Einstellung der Ladungsträgerlebensdauer durch gezieltes Erzeugen von Rekombinationszentren eingesetzt. Im Bereich mittlerer Dosen ab etwa $10^{13} \text{ p}^+ \text{cm}^{-2}$ bis