

NUMERISCHE ANALYSE DER BULK-BARRIER DIODE

E. Langer (1), S. Selberherr (1), H. Mader (2)

(1) Inst. für Allgemeine Elektrotechnik und Elektronik, TU Wien
(2) Siemens AG, Zentrale Forschung und Entwicklung, München

ZUSAMMENFASSUNG:

Es wird eine selbstkonsistente numerische Analyse von Bulk-Barrier Dioden (BBD) vorgestellt, welche mittels eines Computerprogrammes unter Berücksichtigung der Effekte zweiter Ordnung durchgeführt worden ist. Die Funktionsweise einer BBD wird anhand von Verteilungen der relevanten physikalischen Größen im Inneren der BBD erläutert. Gemessene und gerechnete Kennlinien, welche aufgrund der sorgfältigen Modellierung der physikalischen Parameter gute Übereinstimmung aufweisen, werden verglichen. Untersuchungen der Sensitivität gegenüber geringen Änderungen des Dotierungsprofils werden aufgezeigt und die Vor- und Nachteile einer BBD diskutiert.

1. Einleitung

Bulk-Barrier Dioden (BBD) sind relativ neue Bauelemente, deren zukünftige Anwendung vor allem bei integrierten Schaltungen vielversprechend ist. Der Stromtransport erfolgt bei BBDn im wesentlichen durch Majoritätsträger und wird durch eine 'Bulk-Barriere', welche rein technologisch einstellbar ist, gesteuert. Auf den ersten Blick erscheint die BBD mit einer Schottky-Diode, welche ebenfalls ein Majoritätsträgerbauelement ist, vergleichbar; der bemerkenswerteste Unterschied besteht darin, daß sich die Barriere der Schottky-Diode am Metall-Halbleiter-Übergang befindet und technologisch nicht beeinflussbar ist.

Diese Abhandlung beschäftigt sich mit einer numerischen Analyse der BBD, welche mittels eines Computerprogrammes durchgeführt worden ist. Das diesem Programm zugrundeliegende physikalische Modell und die Modellierung der physikalischen Parameter (wie z.B. Trägerbeweglichkeiten, Rekombination) können aus Platzgründen nicht in dieser Arbeit erfolgen und sind in

/8/ zu finden. Es ist weiters nicht die Aufgabe dieser Abhandlung, das numerische Lösungsverfahren zu beschreiben, insbesondere da unsere Analyse nur eindimensional ist. Diodenanalysen dieser Art sind bereits 1968 veröffentlicht worden /6,7/ und kürzlich veröffentlichte Artikel handeln von zweidimensionalen transienten /2,3,5,11/ oder sogar dreidimensionalen Analysen /4/. Für viele praktische Anwendungen ist jedoch ein eindimensionales Halbleitersimulationsprogramm vollkommen ausreichend. In Kapitel 2 werden die errechneten Verteilungen der physikalischen Größen für verschiedene Arbeitspunkte besprochen, um die für die Funktionsweise einer BBD verantwortlichen Effekte zu veranschaulichen. In Kapitel 3 wird ein Vergleich zwischen Messung und Simulation vorgestellt, durch den die Anwendbarkeit des physikalischen Modells bestätigt wird.

2. Das interne Verhalten von Bulk-Barrier Dioden

Unseren Untersuchungen liegt eine BBD mit einem p^+np -Dotierungsprofil zugrunde. Im folgenden soll die prinzipielle Funktionsweise einer BBD erklärt werden: Das n-Gebiet ist relativ dünn, sodaß dieses bereits ohne angelegte Spannung an freien Elektronen verarmt ist; die p^+np -Diode befindet sich im 'punch-through' /12/. Legt man eine positive Spannung zwischen das p- und das p^+ -Gebiet, so ist der p^+n -Übergang - zukünftig der erste Übergang genannt - in Sperr- und der np -Übergang - der zweite Übergang - in Flußrichtung gepolt. Da die Dotierung im p^+ -Gebiet höher als im n-Gebiet ist, dehnt sich die Raumladungszone hauptsächlich in das n-Gebiet aus. Zufolge des 'punch-through' fließt schon bei relativ geringen Spannungen ein Löcherstrom vom p- zum p^+ -Gebiet; die BBD ist in Flußrichtung gepolt. Die Kniespannung einer BBD kann durch das Dotierungsprofil und die Dicke des n-Gebietes, also mittels technologischer Schritte, eingestellt werden.

Legt man eine negative Spannung zwischen das p- und p^+ -Gebiet, so ist der zweite Übergang rückwärts gepolt. Dieser Übergang ist aufgrund der niedrigen Substratdotierung imstande zu sperren, da sich die Verarmungszone im wesentlichen in das Substratgebiet ausdehnt; die BBD ist in Sperrichtung gepolt. Für weitere Erläuterungen der eben beschriebenen Vorgänge sei auf /9,10/ verwiesen.

Da das Dotierungsprofil das Verhalten der BBD in extrem kritischer Weise beeinflusst, wurde der Modellierung des Dotierungsprofils große Bedeutung beigemessen. Dabei verglichen wir für unsere Untersuchungen zwei Versionen von SUPREM, dem Stanford University Process Engineering Modells program /1/, welches für die möglichst konsistente Modellierung des Dotierungsprofils herangezogen wurde. Abb. 1 zeigt zwei Dotierungsprofile, welche das Ergebnis der Simulation mit SUPREM-03 bzw. SUPREM-05 sind. In der neueren Version von SUPREM (05) ist die Form der Borimplantation derart verändert, daß überhaupt kein n-Gebiet existiert. Da der tatsächliche Herstellungsprozeß der BBD ein dünnes n-Gebiet erzeugt, scheint dieses Simulationser-

gebnis darauf hinzudeuten, daß die Veränderungen in SUPREM-05 die zugrundeliegenden physikalischen Effekte überbewerten. Deshalb verwendeten wir Ergebnisse von SUPREM-03 als Eingabe für unser Bauelement-Simulationsprogramm und führten Analysen durch, welche die Sensitivität der elektrischen Eigenschaften einer BBD zufolge Unbestimmtheiten im Dotierungsprofil aufzeigen sollen. In Abb. 1 kann man für das implantierte n-Gebiet eine Dicke von 200 nm ablesen, wenn man das mittels SUPREM-03 erhaltene Ergebnis heranzieht.

Abb. 2 zeigt die Potentialverteilungen im Inneren einer BBD für verschiedene Arbeitspunkte. Man kann anschaulich erkennen, daß die Barriere mit steigender Spannung kleiner wird. An dieser Stelle wäre zu bemerken, daß die Barriere bei Rückwärtspolung mit steigender Sperrspannung zwar ebenfalls abnimmt, aber in wesentlich geringerem Ausmaß, sodaß die Sperrfähigkeit bei mäßigen Sperrspannungen durch diese Barrierenabsenkung nicht beeinträchtigt wird.

Abb. 3 zeigt die Trägerdichtenverteilungen für eine Vorwärtspolung von 0.8 Volt. Die Löcherdichte ist im gesamten Bauelement größer als die Elektronendichte, welche im n-Gebiet aufgrund des 'punch-through'-Effektes verarmt ist. Der Knick in der Elektronendichte am ersten Übergang ist auf Paarerzeugung in der Raumladungszone zurückzuführen.

Abb. 4 zeigt die Trägerdichtenverteilungen für eine Sperrspannung von -1.0 Volt. Man sieht deutlich die Raumladungszone des zweiten Übergangs.

3. Vergleich mit der Messung

Abb. 5 zeigt einen Vergleich zwischen der simulierten und gemessenen Kennlinie einer BBD, wobei das vorhergesagte Diodenverhalten vollkommen bestätigt ist. Die Kniespannung ist zweifellos kleiner als bei einer herkömmlichen Siliziumdiode. Die Verschiebung der Kennlinien im Flußbereich ist zu gering, als daß man von schlechter Übereinstimmung sprechen könnte, und hat ihre Ursache einzig und allein in der Unbestimmtheit des Dotierungsprofils, was durch die Abb. 6,7 untermauert wird.

Abb. 6 zeigt die Flußkennlinien einer BBD im logarithmischen Maßstab. Auf diesem Bild sind zusätzliche simulierte Kennlinien für kleine Änderungen der Implantationsparameter eingezeichnet. Die Verschiebung der Kennlinien eben zufolge dieser Änderungen ist enorm ausgeprägt.

Abb. 7 zeigt die Sperrkennlinien der BBD. Es ergibt sich ein näherungsweise exponentiell von der Spannung abhängiger Sättigungsstrom. Kleine technologische Änderungen ergeben ähnliche Verschiebungen wie bei den Flußkennlinien. Das Sperrverhalten einer BBD ist nicht so gut wie bei einer herkömmlichen Siliziumdiode, was beim Entwurf einer Schaltung zu berücksichtigen ist.

Wägt man alle Vor- und Nachteile ab, so bleibt für die BBD doch ein sehr weites Anwendungsfeld. BBDn sind Majoritätsträgerbauelemente mit diodenähnlichem Verhalten. Die Kniespannung von BBDn kann mittels herkömmlicher technologischer Schritte

eingestellt werden, was einen sehr großen Vorteil gegenüber einer Siliziumdiode darstellt. Die Schaltgeschwindigkeit von BBDn ist sehr hoch zu erwarten, da die hierfür relevante Zeitkonstante, die dielektrische Relaxationszeit, in der Größenordnung von einer Picosekunde liegt. Des Weiteren könnten das kapazitive Verhalten und der differentielle Widerstand für Spezialanwendungen mit Hilfe technologischer Schritte eingestellt werden.

4. Abschließende Bemerkungen

Unser Computerprogramm zur Simulation von beliebigen Siliziumdioden ist imstande, das Verhalten der BBD in befriedigender Weise vorauszusagen bzw. zu analysieren. Diese Anwendung ist wesentlich komplizierter als die Analyse einer herkömmlichen Diode, da die BBD auf eine Vielzahl von Parametern höchst empfindlich reagiert. Nichtsdestoweniger ist eine gute quantitative Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnis und Messung erreicht worden. Eine thermische Analyse kann mit dem Programm ebenfalls durchgeführt werden; eine solche ist in diesem Artikel nicht demonstriert worden, da es sich dabei für die BBD um einen Effekt dritter Ordnung handelt. Das Computerprogramm ist von den Autoren gegen eine Bearbeitungsgebühr erhältlich.

Danksagung

Diese Arbeit wurde vom "Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung" (Projekt Nr. S22-11) unterstützt. Die Autoren danken Dipl. Ing. D. Schornböck und dem gesamten Rechenzentrum für die ausgezeichnete Computerbetreuung und Prof. Dr. H. Pötzl für die vielen nützlichen Diskussionen.

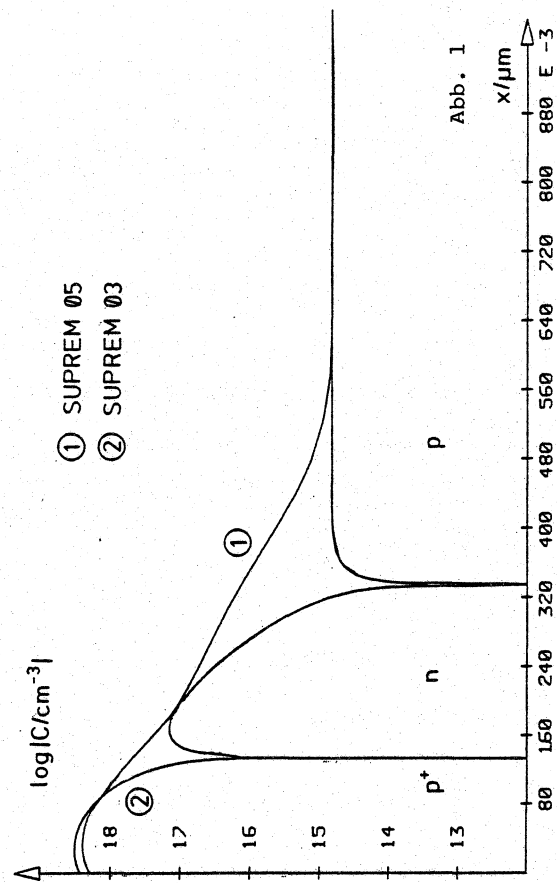


Abb. 1

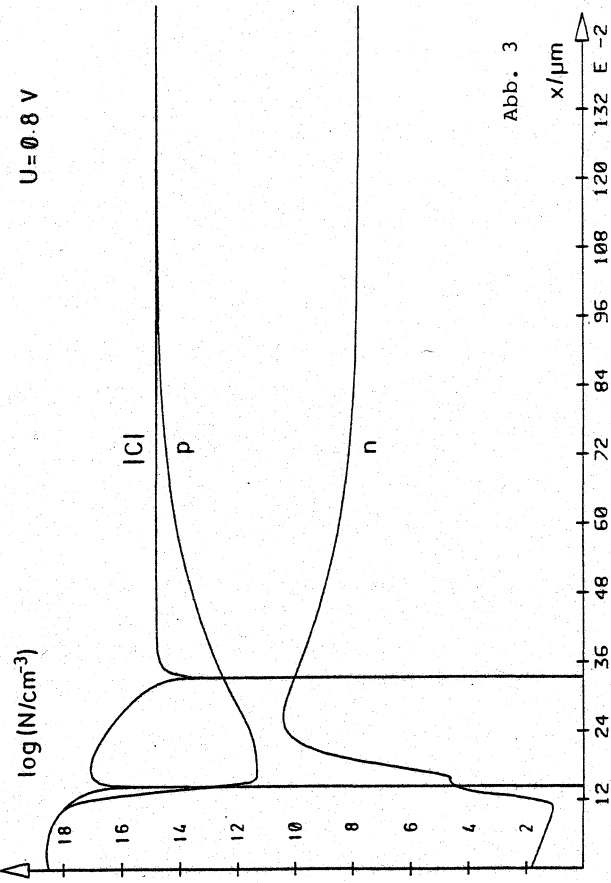
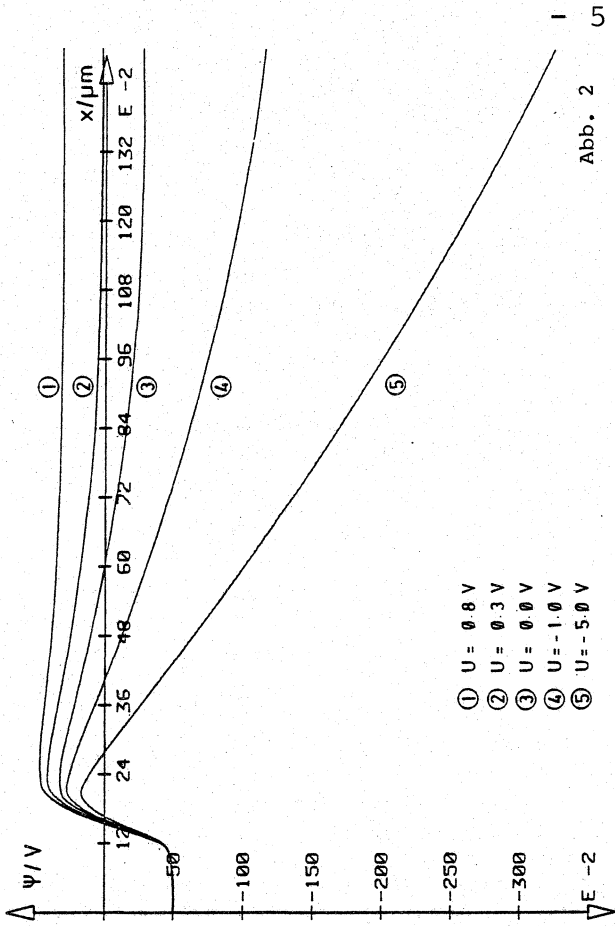


Abb. 3



- ① $U = 0.8V$
- ② $U = 0.3V$
- ③ $U = 0.0V$
- ④ $U = -1.0V$
- ⑤ $U = -5.0V$

Abb. 2

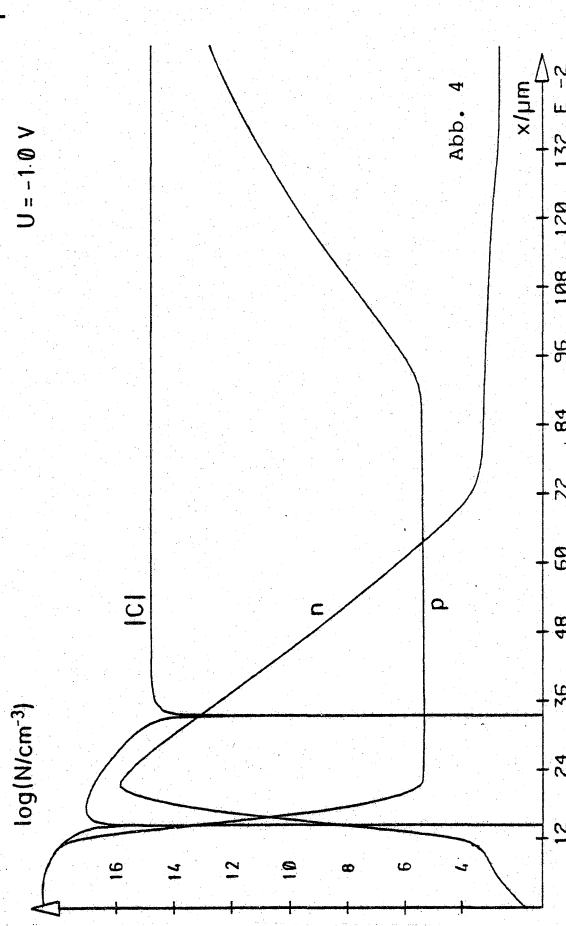


Abb. 4

$U = -1.0V$

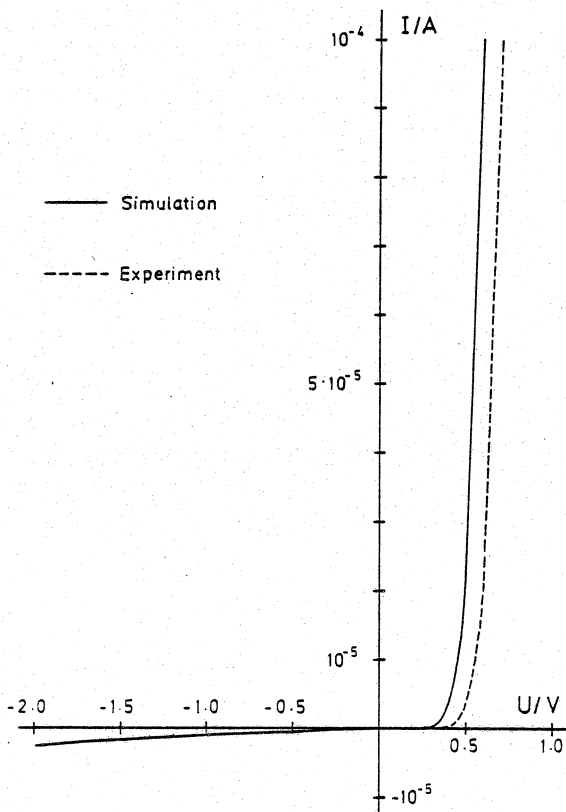


Abb. 5

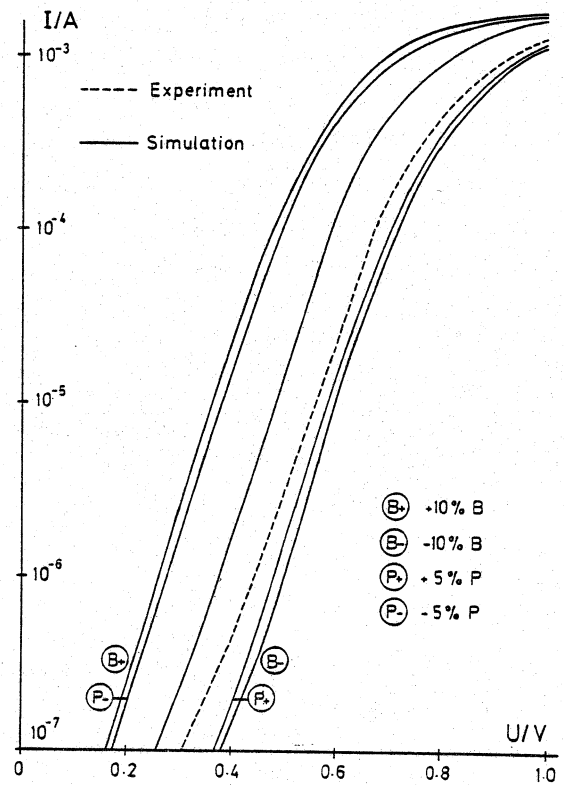


Abb. 6

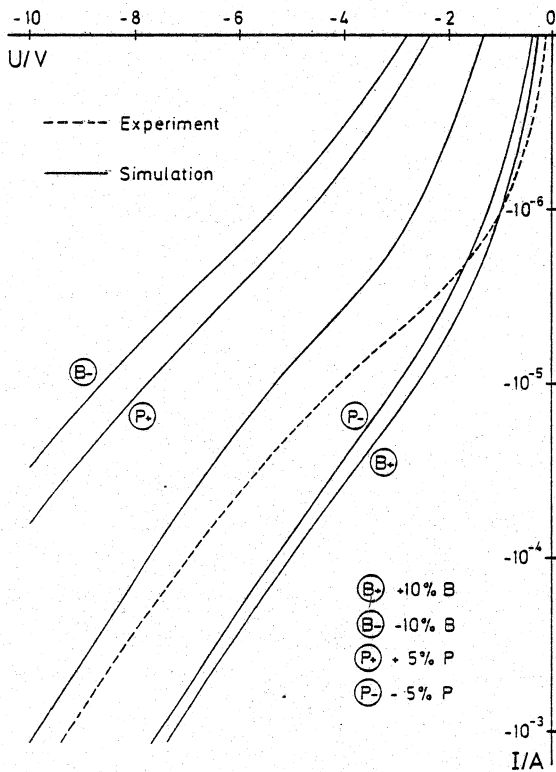


Abb. 7

- /1/ Antoniadis D.A., Hansen S., Dutton R.W.; Stanford Techn. Report No.5019-2, 1978.
- /2/ Barnes J.J., Lomax R.J.; Electron. Lett., Vol.11, p.519, 1975.
- /3/ Buturla E.M., Cotrell P.E.; Solid-State Electron., Vol.23, p.331, 1980.
- /4/ Buturla E.M., Cotrell P.E., Grossman B.M., Salsburg K.A., Lawlor M.B., McMullen C.T.; Proc. Internat. Solid-State Circuits Conf., p.76, 1980.
- /5/ Cotrell P.E., Buturla E.M.; Proc. NASECODE I Conf., p.31, 1979.
- /6/ De Mari A.; Solid-State Electron., Vol.11, p.33, 1968.
- /7/ De Mari A.; Solid-State Electron., Vol.11, p.1021, 1968.
- /8/ Langer E.; Diplomarbeit, TU Wien, 1980.
- /9/ Mader H.; Dissertation, TU München, 1976.
- /10/ Mader H.; Europäisches Patent No. 0003101979.
- /11/ Manck O.; Dissertation, TH Aachen, 1975.
- /12/ Sze S.M.; "Physics of Semiconductor Devices", Wiley, New York, 1969.