

Prom. Nr. 3661

Untersuchungen über Durchbruch- erscheinungen in Halbleitersperr- schichten und deren Anwendungen, insbesondere von Tunneldioden

VON DER
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR ERLANGUNG
DER WÜRDE EINES DOKTORS DER
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON
Hans Melchior
dipl. El.-Ing. ETH
von Ausserferrera (Kt. Graubünden)

Referent: Herr Prof. Dr. M. J. O. Strutt
Korreferent: Herr Prof. Dr. F. E. Borgnis

Zürich 1965
Offsetdruck: Schmidberger & Müller

1. Das Rauschen von Halbleiterdioden im Bereich des primären Durchbruches

1.1 Einleitung und Zusammenfassung

Im Bereich des primären Durchbruches weisen Halbleiterdioden starkes Rauschen auf und zeigen zum Teil Instabilitäten im Verlauf ihrer Durchbruchkennlinien [1-16]. Die Ursachen dieses grossen Rauschens sind erst teilweise bekannt.

Bekannt ist, dass instabile Bereiche im Verlauf der Durchbruchkennlinie auftreten, wenn einzelne Durchbruchkanäle, die sogenannten Mikroplasma [2-3], bei ihrem Einsatzpunkt in statistischer Folge ein- und ausschalten [4, 6, 8, 9, 15]. Die dabei beobachteten Strom- und Spannungsimpulse sind in ihrer Amplitude, Form und Anzahl abhängig vom Arbeitspunkt [4, 12, 15] und von der äusseren elektrischen Belastung der Diode [6, 9, 12, 16]. Allfällige Wärme-, Licht- und Teilcheneinstrahlungen und auch mechanische Beanspruchungen haben einen Einfluss auf die Schalthäufigkeit dieser Mikroplasma [5, 16 - 24]. Das Frequenzspektrum der bei ihrem Einsatzpunkt in statistischer Folge ein- und ausschaltenden Durchbruchkanäle macht sich als starkes Rauschen bemerkbar [6, 9, 15, 16].

Meist wird im Schrifttum nur auf dieses Rauschen, das mit dem instabilen Ein- und Ausschalten von einzelnen Durchbruchkanälen verbunden ist, hingewiesen [15]. Halbleiterdioden rauschen aber auch sehr stark in den stabil brennenden Teilen ihrer Durchbruchkennlinien. Ueber dieses Rauschen sind jedoch nur wenige Angaben zu finden [5, 10, 11]. H. J. Stöhr [11] gibt breitbandig gemessene Rauschspannungen an für verschiedene Zenerdioden. Er gelangt dabei zu den folgenden Feststellungen: Der Verlauf der Rauschspannung in Abhängigkeit vom Durchbruchstrom ist bei mehreren Exemplaren des gleichen Diodentyps völlig verschieden. Die Rauschspannungskurve eines Exemplares hingegen ist reproduzierbar. Mit wachsendem Durchbruchstrom nimmt die Amplitude der Hüllkurve der Rauschspannungshöcker stark ab, während die maximal abgebbare Rauschleistung weniger stark abfällt.

Eigene Untersuchungen [16, 17] haben ergeben, dass verschiedenartige Rauscheigenschaften auftreten, je nachdem, welches die Ursache des Durchbruches in einer Halbleiterdiode ist.

Im nachfolgenden Teil dieser Arbeit werden die Gleichspannungskennlinien und die Rauscheigenschaften von Halbleiterdioden im Bereich des primären Durchbruchs eingehender untersucht. Vorerst wird eine Einteilung der verschiedenen Durchbruchtypen, welche in Halbleiterdioden beobachtet werden, angegeben. Die wichtigsten Spannungsdurchbrüche sind der Stossionisations- oder Lawinendurchbruch [2-9, 12-15, 37, 39-48, 50-67] und der Zener-, Tunnel- oder innere Feldemissionsdurchbruch [25-33, 37, 42, 58]. Das Hauptunterscheidungsmerkmal zwischen Stossionisations- und innerem Feldemissionsdurchbruch ist die unterschiedliche Temperaturabhängigkeit der Durchbruchspannung $U_Z(T)$ bei konstant gehaltenem Durchbruchstrom I [2, 30, 34, 35, 37]:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial U_Z}{\partial T} \\ I = \text{konstant} \end{array} \right\} \begin{array}{l} < 0 & \text{innere Feldemission} \\ > 0 & \text{Stossionisation} \end{array}$$

Es treten auch Durchbrüche mit Kombinationen von innerer Feldemission und den verschiedenen Typen von Stossionisation auf [5, 27, 30, 34, 35, 37].

Die Halbleiterdioden werden auf Grund der Temperaturabhängigkeit und des Verlaufs ihrer Durchbruchkennlinien in dieses Unterteilungsschema eingeordnet. Auch die Grösse der Durchbruchspannung [5, 30, 34, 37] und das Auftreten oder Nichtauftreten von Trägermultiplikationen [2, 30, 39, 46] kann zur Unterscheidung der verschiedenen Durchbruchtypen verwendet werden. Aus unsern Untersuchungen ist ersichtlich, dass auch Rauschmessungen im Durchbruchbereich Aufschluss geben können über die Art des Durchbruches in einer bestimmten Halbleiterdiode.

Von einzelnen Dioden, welche für die verschiedenen Durchbrucharten typisch sind, wird das Kleinsignal-Ersatzschaltbild in Abhängigkeit vom Durchbruchstrom bestimmt. Aus schmalbandigen Rauschmessungen bei verschiedenen Frequenzen und Sperrschichttemperaturen werden die Rauschstrom- und Rauschspannungsquellen im Kleinsignal-Ersatzschaltbild dieser Dioden bestimmt.

Es wird festgestellt, dass die Rauschspektren von Durchbrüchen in Halbleiterdioden frequenzunabhängig sind im Bereich von etwa 200 Hz bis 500 kHz oder höher. Bei tiefen Frequenzen macht sich je nach Diode ein verschieden starkes $1/f$ -Rauschen bemerkbar. Bei hohen Frequenzen bewirkt die Sperrschichtkapazität eine Verminderung der gemessenen Rauschspannungsquadrate.

Halbleiterdioden rauschen im Bereich des Spannungsdurchbruches in den meisten Fällen viel stärker, als nach dem Schrotrauschen des Durchbruchstromes oder nach dem thermischen Rauschen des differentiellen Durchbruchwiderstandes bei der Messtemperatur zu erwarten wäre. Diese Rauschursachen und auch des Rekombinations-Generations-Rauschen [70, 71, 72] reichen nicht aus zur Erklärung des Rauschens von Halbleiterdioden im Durchbruchgebiet. Zudem ergeben sich andere Stromabhängigkeiten des Rauschens, als nach diesen Ursachen zu erwarten wären.

Wir haben gefunden, dass die in Abhängigkeit vom Durchbruchstrom experimentell ermittelten Rauschstrom- und Rauschspannungsquadrate zum Teil durch empirisch eingepasste Funktionen beschrieben werden können. Die wichtigsten Resultate unserer Messungen und die Versuche zu deren Deutung seien hier kurz zusammengestellt.

In Silizium-Dioden, deren Durchbruch auf innerer Feldemission beruht, wächst das im frequenzunabhängigen Bereich pro Hertz Bandbreite bestimmte Rauschstromquadrat $i_r^2/\Delta f$ nach einem Potenzgesetz mit dem Durchbruchstrom I an. Für Dioden mit einer für innere Feldemission schon recht hohen Durchbruchspannung von $U_Z \sim 4 - 6$ V gilt:

$$\frac{i_r^2}{\Delta f} \sim I^{3/2}$$

Dieses Rauschen kann wie folgt gedeutet werden. In den Sperrschichten dieser Dioden treten durch Raumladungseffekte des Durchbruchstromes bedingte differentielle Widerstände auf. Die im hohen elektrischen Feld der Sperrschicht aufgeheizten Ladungsträger des Durchbruchstromes können sich als thermisches Rauschen dieser differentiellen Widerstände bemerkbar machen. Die äquivalente Rauschtemperatur, die von diesen heißen Ladungsträgern herrührt, steigt in diesen Durchbrüchen mit innerer Feldemission mit der Wurzel des Durchbruchstromes an.

Erreichen die Ladungsträger in einem auf innerer Feldemission beruhenden Durchbruch eine genügend hohe Energie, so setzt Stossionisation ein [5, 17, 30, 34, 35, 46, 58, 81]. Beim Einsatz der Stossionisation stimmen die experimentell ermittelten äquivalenten Rauschtemperaturen recht gut mit den aus der für die Stossionisation notwendigen Energie [30, 46, 64] berechneten mittleren Temperatur der heißen Ladungsträger überein.

In Durchbrüchen mit innerer Feldemission und Stossionisation steigt das Rauschstromquadrat pro Hertz Bandbreite nach einem Potenzgesetz mit dem Durchbruchstrom an.

$$\frac{\overline{i_r^2}}{\Delta f} \sim I^a$$

Je nach Diode und Messtemperatur nimmt der Exponent a Werte zwischen 1,5 und 2,5 an [16, 17].

In Dioden mit höheren Durchbruchspannungen entsteht der Durchbruch durch Stossionisation von Ladungsträgern in der Sperrschicht [2, 7, 8, 12, 13, 34, 35, 37-42, 44-48, 50, 54-67]. Da die meisten Dioden Inhomogenitäten in der Sperrschicht [7, 12, 48, 55, 58, 62] aufweisen, bestehen diese Durchbrüche anfänglich aus einzelnen Durchbruchkanälen, die sich an diesen inhomogenen Stellen ausbilden [3, 4, 6, 7, 9, 12, 14, 15, 21, 23, 24, 34, 37, 44, 52, 60, 66, 67].

Solche Stossionisationskanäle schalten bei kleinen Durchbruchströmen in statistischer Folge ein- und aus [4, 6, 8, 9, 15]. Dioden mit instabil ein- und ausschaltenden Durchbruchkanälen weisen das schon eingangs erwähnte starke lastabhängige Rauschen auf.

In selbständig brennenden Stossionisationskanälen erzeugen die Raumladungen des Durchbruchstromes differentielle Ausbreitungswiderstände in der Sperrschicht. Der Durchbruchstrom in den einzelnen Stossionisationskanälen wird durch diese differentiellen Widerstände begrenzt.

Die äquivalente Rauschtemperatur des differentiellen Widerstandes von stabil brennenden Stossionisationsdurchbrüchen kann Werte von einigen 10^5 bis 10^7 °K annehmen. Diese Rauschtemperaturen sind viel höher als die Rauschtemperaturen, welche die heissen Ladungsträger über dem differentiellen Widerstand eines Durchbruchkanals hervorrufen können. Wir nehmen an, dass diese grossen Rauschströme und Rauschspannungen von Schwankungen der Stossionisationsrate in einzelnen Regionen dieser Durchbruchkanäle herühren.

Die vorliegenden Messungen zeigen, dass die Rauschspannungsquadrate pro Hertz Bandbreite in stabil brennenden Stossionisationsdurchbrüchen mit guter Näherung umgekehrt proportional zum Durchbruchstrom abnehmen.

$$\frac{\overline{U_r^2}}{\Delta f} \sim \frac{1}{I}$$

Bei wachsendem Durchbruchstrom machen sich die Instabilitäten von neu einschaltenden Mikroplasmakanälen jeweils durch einen Anstieg des Rauschens bemerkbar.

Am Schluss des ersten Kapitels werden in Abschnitt 1. 7 einige technische Anwendungsmöglichkeiten von rauschenden Zenerdioden diskutiert.

1. 2 Systematische Einteilung der Durchbrüche in Halbleiterdioden

Die Durchbrüche durch Sperrschichten von Halbleiterdioden und Transistoren können in verschiedene Typen unterteilt werden. Diese Unterteilung kann nach den physikalischen Ursachen des Durchbruches erfolgen.

In Tabelle 1. 1 ist eine grobe Unterteilung der Durchbrüche in Halbleiterdioden und Transistoren angegeben. Die in diesem Kapitel speziell untersuchten Spannungsdurchbrüche sind in Tabelle 1. 2 zusammengestellt. Diese Zusammenstellungen erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie sollen vielmehr die Uebersicht über die in den nachfolgenden Abschnitten beschriebenen Spannungsdurchbrüche erleichtern.

Da jeder Durchbruchtyp ein anderes Verhalten aufweist, können einzelne Durchbrüche in Halbleiterdioden und Transistoren auf Grund ihrer Eigenschaften in dieses Unterteilungsschema eingeordnet werden (siehe auch Abschnitt 1. 1).

Die Durchbrüche in Halbleitersperrschichten und Transistoren weisen viele Analogien zu den Gasentladungen auf. Einige davon seien hier aufgezählt: