



Doctoral Thesis

## **Analysis and numerical simulation of current filamentation in power semiconductor devices**

**Author(s):**

Lilja, Klas

**Publication Date:**

1992

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-000695771> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH Nr. 9866

**ANALYSIS AND NUMERICAL SIMULATION OF  
CURRENT FILAMENTATION IN POWER  
SEMICONDUCTOR DEVICES**

A Dissertation Submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ZÜRICH

for the Degree of  
Doctor of Natural Sciences

Presented by  
**Klas Lilja**

M. Sc., CHALMERS Technical University, Göteborg

born January 27, 1961

citizen of Sweden

Accepted on the recommendation of

Prof. T.M. Rice, examiner

Prof. W. Fichtner, co-examiner

*J. M. Rice*

1992



CatE

## Summary

Current filamentation is an instability in semiconductors which leads to a concentration of the current to a small spot, a filament. It is a severe problem in the development of power semiconductor devices. It limits device performance and can lead to device destruction. In order to design reliable devices for high power applications a correct and profound understanding of the filamentation phenomenon is required. In this thesis we analyze and explain the occurrence of filamentation in thyristors with turn-off capability and in bipolar power transistors.

A very effective and complete way to study and understand phenomena in semiconductor devices is by means of numerical simulation and modeling. We use such methods intensively in our investigations and we give a profound background to the physical models and numerical methods used. We also discuss the derivation and validity of the models, in particular under high electric field conditions.

The part of this work concerned with computer-program development consists in the extension to power device applications of an existing simulation program. The new implementations contains, among other things, heat transport and heat generation, a general external circuit facility and models for impact ionization. We describe some important details of the numerical methods used and present a novel method to implement the mechanism of impact ionization which has very good convergence properties.

The first filamentation phenomenon we simulate and analyze is the thermal second breakdown in bipolar power transistors. The cause of this instability is the thermal generation of minority carriers in the collector as has been suggested in the literature. The phenomenon is structurally unstable and will lead to development of a current filament. We present a complete numerical simulation of the appearance and evolution of such a filament.

The major topic in this thesis is the *current filamentation problem* in thyristors with turn-off capability, i.e., which can be turned off by a gate signal, like the Gate Turn-off Thyristor (GTO) and the MOS Controlled Thyristor (MCT). The basic cause of the instability in thyristors is well known, it is the four layer structure. The goal of our investigation is to find out and describe the details of when it becomes critical to the behaviour of the device. In order to understand and explain this we study a number of different realistic turn-off situations by numerical simulation.

Thyristors with turn-off capability have a fine-structured cathode, split into smaller structures (cells, stripes) surrounded by gate (figure 5.5). We have found that under normal conditions a current redistribution among these structures will always occur during turn-off. Even a very small perturbation (far below average fabrication inhomogeneities) is enough to cause a complete current

redistribution to a small part of the device, creating a current filament and preventing proper device operation.

By using a very hard gate drive, with a turn-off gain less than 1.0, we show that the current redistribution can be avoided and a homogeneous turn-off can be achieved.

We also study the effect of protective snubber circuits as are used today in GTO applications. Simulations of how a capacitive snubber damps the current redistribution and allows for a proper device turn-off are shown. The snubber limits the rise in voltage over the device and thereby reduces the current increase in the filamenting parts of the device.

Finally, we present a new MOS-gated device (the FiBS). The FiBS is a thyristor with turn-off capability which is stable against current filamentation.

## Zusammenfassung

Stromfilamentierung ist ein Instabilitätsphänomen in Halbleitern welches zu einer Konzentration des Stromes auf einer Stelle, einem Stromfilament, führt. Dieses Problem behindert stark die Entwicklung von Leistungs Halbleiter-Bauelementen indem die Funktionsmöglichkeiten der Bauelemente begrenzt werden. Im Extremfall kann Stromfilamentierung sogar zur Zerstörung führen. Um zuverlässige Bauelemente entwickeln zu können, ist eine korrekte und grundlegende Kenntnis über das Filamentierungsphänomen nötig. In dieser Dissertation wird das Phänomen und seine Entstehung in Transistoren und Thyristoren analysiert und erklärt.

Halbleiterbauelemente werden am besten und effizientesten mittels numerischer Simulation studiert und analysiert. In dieser Arbeit haben wir häufig solche Methoden verwendet, und einige neue Modelle und Verfahren sind entwickelt worden.

Ein Satz von Standardgleichungen für die Simulation von Halbleitern ist in der Literatur vorhanden. Wir beschreiben deren Herleitung und diskutieren ihre Gültigkeit, insbesondere bei hohen elektrischen Feldern.

Derjenige Teil dieser Arbeit, welcher sich mit der Entwicklung von Computer-programmen beschäftigt, besteht darin, ein vorhandenes Program zu verbessern und zu erweitern um die Simulationsbedürfnisse für Leistungskomponenten zu decken. Die Erweiterungen bestehen unter anderem darin, eine Wärmeleitungsgleichung, einen allgemeinen äusseren Schaltkreis, und ein Model zur Beschreibung der Stoßionisation einzubauen. Wir beschreiben einige Details der verwendeten numerischen Methoden und präsentieren eine neue Methode zur Implementierung der Stoßionisation.

Das erste Filamentierungsphänomen, welches wir untersuchen und simulieren ist der sogenannte zweite Durchbruch in Bipolar-Transistoren (thermal second breakdown). Die Ursache dieser Instabilität ist eine thermische Generation von Minoritätsladungsträgern im Kollektor, wie sie auch vorgeschlagen worden ist in der Literatur. Das Phänomen ist instabil gegenüber Bildung inhomogenen Strukturen und führt zur Entwicklung von Stromfilamenten. Wir präsentieren eine vollständige numerische Simulation der Entstehung und Entwicklung eines solchen Filamentes.

Das Hauptthema dieser Arbeit ist die Filamentierung in abschaltbaren Thyristoren, wie dem GTO (Gate Turn-Off Thyristor) oder dem MCT (MOS Controlled Thyristor). Die grundlegende Ursache für die Instabilität in Thyristoren ist bekannt, es sind die vier Dotierungsschichten der Struktur. Ziel unserer Arbeit ist es, im Detail herauszufinden, wann die Instabilität die normale Funktion der Elemente verhindert. Dazu haben wir eine Anzahl von realistischen Abschaltvorgängen mittels numerischer Simulation studiert.

Abschaltbare Thyristoren haben eine feinstrukturierte Kathode, aufgeteilt in "Zellen" or "Streifen" die von der Gateelektrode umgeben sind (Fig. 5.5). Unsere Untersuchung hat gezeigt, daß sich unter normalen Umständen, der Strom während des Abschaltvorganges immer zwischen den Kathodenstrukturen unverteilt wird. Auch sehr kleine Störungen (viel geringer noch als die Herstellungsinhomogenitäten) führen zu einer vollständigen Umverteilung des Stromes, d.h. zur Konzentration in einem kleinen Teil des Bauelements. Eine richtige Abschaltfunktion des Elementes wird durch Bildung eines solchen Filamentes verhindert.

Wir zeigen, daß durch Anwendung einer sehr harten Ansteuerung, mit einer Abschaltverstärkung kleiner als 1.0, die Filamentierung vermieden werden kann und ein homogener Abschaltvorgang möglich wird.

Die Wirkungen von kapazitiven Schutzkreisen (snubbers), wie man sie normalerweise in GTO Anwendungen benützt, wird auch untersucht. Simulationen der Wirkung eines Snubberkreises, wie er die Stromumverteilung dämpft und ein richtiges Auschalten erlaubt, werden gezeigt. Der Snubberkreis begrenzt den Spannungsanstieg und dadurch auch den Stromanstieg in den Teilen des Bauelementes wo noch Strom fließt.

Abschliessend wird ein neues MOS-gesteuertes Bauelement vorgestellt (FiBS). Diese neue Struktur besitzt die wünschenswerten Eigenschaften eines abschaltbaren Thyristors und garantiert ein stabiles, homogenes Schalten.