

Diss. ETH No. 13773

Application-Specific Improvements on Fast Recovery 4.5kV Press-Pack Rectifiers

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
OLIVER HUMBEL
Diplom-Physiker, Univ.
born May 24, 1972
citizen of Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. W. Fichtner, examiner
Dr. S. Linder, co-examiner

2000

Zusammenfassung

Aufgrund der stetigen Forderung nach höheren Schaltfrequenzen benötigt die neue Generation der Leistungsschalter, wie der GCT (Gate-Commutated Thyristor, auch bekannt als hart angesteuerter Gate Turn-off Thyristor) und der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) verbesserte Diodenkonzepte. In diesen neuen Anwendungen gewinnen beschaltungsfreie Kommutierungsbedingungen an Bedeutung, welche sehr hohe di/dt und dv/dt Schalttransienten ermöglichen.

Neben den normalen Anforderungen, wie kleinen statischen und dynamischen Verlusten, einem unter allen Betriebsbedingungen rückstromabrissfreien Abkommutierverhalten (besonders bei kleinen abzuschaltenden Stromdichten und hohen Zwischenkreisspannungen) und einem kleinen maximalen Rückstrom, ist der Bedarf nach einer grossen *SOA* (Safe Operating Area) von besonderer Bedeutung. Das optimale Diodendesign ist abhängig von den speziellen Anwendungsbedingungen. Die elektrische Belastung der schnellen Leistungsdioden wird für zwei unterschiedliche Anwendungen, dem induktiv abgeklemmten und dem resistiven Schalten untersucht.

Um das Abkommutierverhalten zu verbessern, muss die statische Überschussladungsträgerkonzentration an der Anode reduziert werden. Die lokale Lebensdauereinstellung hat sich als sehr erfolgreiches Instrument zur Optimierung der Verteilung der Überschussladungsträgerkonzentration innerhalb eines Elementes erwiesen. Deshalb wurden numerische Simulationen, welche Lebensdauereinstellungen beinhalten durchgeführt und die Resultate mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Dabei wurde eine ausgezeichnete Übereinstimmung von simuliertem und gemessenem Abkommutierverhalten erreicht.

Der Vergleich zweier 4500 V Dioden mit einer im Hinblick auf grössere Zwischenkreisspannungen erhöhten SOA wird gezeigt. Um die Injektionseffizienz der Anode einzustellen, wurden zwei heute bereits gebräuchliche Technologien, die der Reduzierung der Emitterdotierung und die der Ionenbestrahlung in die p-dotierten Gebiete miteinander verglichen.

Die Technologie der lokalen Lebensdauereinstellung zeigt wesentliche Vorteile gegenüber der der Emitterdotierungsreduktion. Diese Vorteile äussern sich in 50% kleineren Schaltverlusten bei gleichen statischen Verlusten, welche durch einen wesentlich geringen maximalen Rückstrom verursacht werden. Zusätzlich zeigt die ionenbestrahlte Diode ein deutlich weiches Abkommutierverhalten. Eine Erklärung dieses experimentell beobachteten Verhaltens wird mittels kalibrierter Computersimulation gegeben.

Desweiteren wurden 4500V Elemente mit einer neuen Bestrahlungstechnik gefertigt, bei der die Elektronenbestrahlung durch eine zweite Protonenbestrahlung ersetzt wurde. Die Tiefe des zweiten Protonen-Peaks befindet sich dabei inmitten der n^- -Basis. Verglichen mit der kombinierten Ionen- und Elektronenbestrahlung, zeigen Dioden mit einem Doppel-Protonen-Peak einen kleineren maximalen Rückstrom und ein wesentlich weiches Abkommutierverhalten. Das neue Element ist ausserordentlich robust, was sich in einem zerstörungsfreien Abschalten auch bei auftretenden Leistungsdichten von $1\text{MW}/\text{cm}^2$ äussert.

Schliesslich wird eine neue Methode zur Lebensdauereinstellung in schnellen Leistungsdioden aufgezeigt, welche eine willkürliche axiale Lebensdauereinstellung innerhalb eines Bestrahlungsschritts ermöglicht. Das von [1] entwickelte Prinzip basiert auf einer Maskierung der Bestrahlung, wobei die Maske zwischen der Ionenquelle und dem Element platziert wird.

Abstract

With increasing demand for higher switching frequencies, new power switches such as the Gate-Commutated Thyristor (formerly called hard-driven Gate Turn-off Thyristor) and the IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) require improved diode concepts. Snubberless conditions in these applications are gaining ground, imposing switching transients with very high di/dt and dv/dt values. This leads to new challenges in diode development.

Besides the standard criteria of low static and dynamic losses, soft recovery under all application conditions (in particular at low turn-off forward current density and a high line voltage) and low reverse recovery current, the need for a large SOA (Safe Operating Area) has become most important. The optimum diode design depends on the specific application conditions. The electrical stress on fast recovery rectifiers is analyzed for two different applications, clamped inductive and resistive switching.

In order to improve the reverse recovery characteristic, the excess carrier concentration close to the anode during the on-state has to be reduced. Local lifetime control has proven to be very successful in optimizing the excess carrier distribution in a device. Therefore, computer simulations employing lifetime profiles were performed and compared to the measured results. An excellent agreement of simulated and measured recovery characteristics was achieved.

The comparison between two 4500 V devices with expanded SOA with regard to higher line voltages is shown. In order to control the injection efficiency of the anode, two state-of-the-art technologies, the

reduction of the emitter doping and the ion irradiation in the p-doped region, are compared.

The local lifetime control technique is shown to have major advantages compared to the emitter doping reduction technique, namely up to 50 % lower switching losses at the same on-state losses due to a heavily reduced maximum reverse recovery current. Additionally, a softer switching behavior is observed for the ion-irradiated diodes. An explanation for this behavior, which was observed experimentally, is provided by calibrated computer simulations.

Furthermore, a 4500 V device was fabricated using a new ion irradiation technique, where electrons are replaced by protons in a second irradiation step. The second proton peak is located well within the n^- -base. Compared to the combined ion and electron irradiation, diodes with a double proton peak show a smaller maximum reverse recovery current and a much smoother tail current behavior. The new device has an excellent ruggedness, being able to withstand a peak power density of 1 MW/cm^2 .

Finally, a new approach to lifetime control in fast recovery power diodes, arbitrary axial lifetime profiling by single-step ion irradiation, is described. The principle, which invented by [1], is based on irradiation through a mask, which is inserted between the ion source and the device.