

Pett-Schwingungen in Leistungsmodulen mit parallel geschalteten Bauelementen

Ralf Siemieniec¹, Paul Mourick², Josef Lutz³, Mario Netzel¹

¹TU Ilmenau, Fachgebiet Festkörperelektronik, PF 100565, 98684 Ilmenau

²Ingenieurbüro, Auerbacher Weg 12, 69427 Oberscheidental

³TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, 09107 Chemnitz

1 Vorstellung der untersuchten Leistungsmodule

Die im folgenden vorgestellten Untersuchungen zu den Pett (Plasma Extraction Transit Time) Oszillationen wurden an modifizierten Modulen SKM600GAR126 und SKM600GAL126 der Firma Semikron durchgeführt. Fig. 1 zeigt die entsprechenden Schaltbilder. Die Sperrspannung der Module beträgt 1200V, der zulässige Maximalstrom 600A. Um diesen Strom zu realisieren, wurden jeweils 4 IGBT und 4 Freilaufdioden parallel geschaltet. Konstruktiv betrachtet sind immer zwei Chips pro DCB-Substrat (Direct Copper Bonding) parallel geschaltet, die einzelnen DCB's sind wiederum über Kontaktfahnen miteinander verbunden (Fig. 2).

2 Entstehung der Pett-Oszillation

2.1 Zugrundeliegender Mechanismus

Pett-Oszillationen sind ein erst seit relativ kurzer Zeit bekanntes Phänomen [2]. Sie wurden zuerst in Modulen mit parallel geschalteten IGBT-Chips beobachtet [2], aber auch bei parallel geschalteten Freilaufdioden sowie bei einfachen, nicht parallel geschalteten IGBT's gefunden [4].

Fig. 3 zeigt die Messung einer Pett-Schwingung, welche während des Abkammerens der Freilaufdioden auftritt. Die Oszillationen treten zwischen den Dioden jeweils einer Gruppe auf und können nicht direkt gemessen werden, stattdessen wurde eine Drahtschleife als Antenne benutzt. Beim Abkammeren einer pin-Leistungsdiode mit Soft-Recovery-Verhalten befindet sich Spannungsaufnahme noch ein Ladungsträgerberg am nn^+ -Übergang. Die Löcher durchlaufen mit der

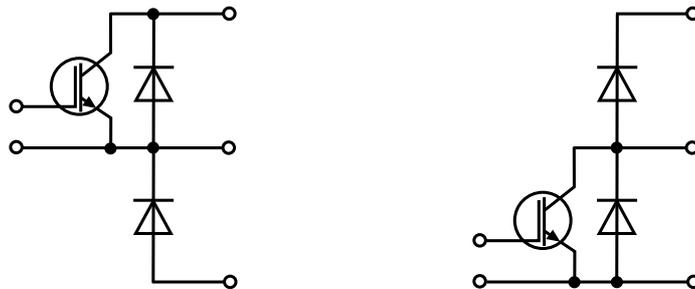


Fig. 1: Ersatzschaltbilder für das Modul GAR (links) und das Modul GAL (rechts)



Fig. 2: Aufbau des Modules GAR (links) und des Modules GAL (rechts)

Sättigungsdriftgeschwindigkeit die bereits aufgebaute Raumladungszone. Dieser Löchertransport verursacht eine Modulation des elektrischen Feldes, die Spannungsänderung über dem Bauelement wird verzögert und ein negativer differentieller Widerstand hervorgerufen. Die Oszillationen treten auf, wenn der negative differentielle Widerstand größer als alle positiven Anteile im kompletten Kreis wird. Die mögliche Schwingfrequenz wird dabei durch die Laufzeit der Löcher durch die Raumladungszone bestimmt. Vereinfacht betrachtet stellen die die Raumladungszone durchlaufenden positiv geladenen Löcher einen zeitabhängigen Verschiebungsstrom dar (zeitabhängig, da zunehmend weniger Ladungsträger vorhanden sind). Das Bauelement stellt demnach eine Kapazität dar, der Resonanzkreis wird durch eine äußere Induktivität - gebildet durch die Bonddrähte - komplettiert. Pett-Oszillationen können damit nur dann auftreten, wenn ein Resonanzkreis existiert, dessen Eigenfrequenz in der Nähe der durch die Trägerlaufzeit bestimmten Transitfrequenz des Bauelementes liegt.

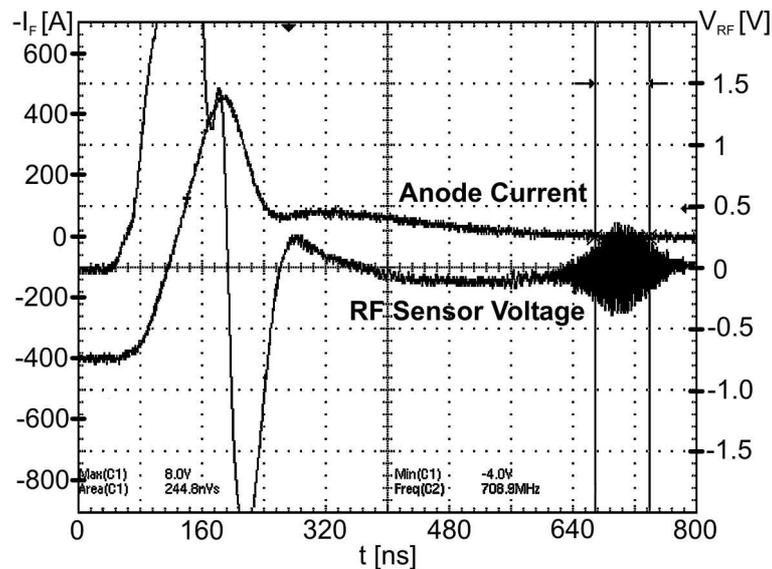


Fig. 3: Pett-Oszillation beim Abkommutieren der Freilaufdioden im Modul GAR ($V_R = 600V$, $I_F = 200A$, $di/dt = 4000A/\mu s$, $T = 300K$)

2.2 Einflußgrößen zum Auftreten der Oszillationen

Aus den im vorhergehenden Abschnitt genannten Überlegungen ergibt sich bereits, daß die Abhängigkeiten, welche schließlich zum Auftreten der Pett-Oszillationen führen, sehr komplexer Natur sind. Die durch die Trägerlaufzeit vorgegebene Frequenz ergibt sich aus der Weite der durchlaufenen Raumladungszone w_{RLZ} sowie der Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger v_d :

$$f \approx \frac{v_d}{w_{RLZ}}$$

Die Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger hängt sowohl von der Stärke des elektrischen Feldes als auch von der Temperatur ab. Die Weite der Raumladungszone dagegen wird durch die zum aktuellen Zeitpunkt anliegende Sperrspannung sowie der Anzahl der zu diesem Zeitpunkt noch vorhandenen Ladungsträger bestimmt. Das bedeutet, daß die Höhe des im eingeschalteten Zustand fließenden Stromes ebenso Einfluß nimmt wie die zeitliche Änderung des Stromes $\frac{di}{dt}$, welche wiederum durch eine Zahl weiterer Parameter (z.B. die Höhe vorhandener Streuinduktivitäten, Wert des Gatewiderstand am IGBT) bestimmt wird.

Die Eigenfrequenz des Resonanzkreises hängt ebenfalls von mehreren Einflußgrößen ab. Die durch die Bonddrähte gebildete Gesamtinduktivität hängt von Länge, Durchmesser, Anzahl und Material der Bonds ab. Die durch das Bauelement selbst gebildete Gesamtkapazität wiederum wird wesentlich durch die Fläche und die Weite der Raumladungszone mit ihren bereits aufgeführten Abhängigkeiten bestimmt. Im Weiteren nehmen noch durch das Modul und die äußere Beschaltung verursachte kapazitive und induktive Anteile Einfluß.

Aufgrund der hohen Zahl möglicher Einflußgrößen ist es offenbar schwierig, eine gesicherte Vorhersage über das Auftreten von Pett-Schwingungen zu treffen. Dies läßt sich anhand von Messungen verdeutlichen. In Fig. 4 ist die am HF-Sensor gemessene Spannung in Abhängigkeit von der anliegenden Zwischenkreisspannung sowie dem Flußstrom für verschiedene Temperaturen dargestellt, jeweils für einen Gatewiderstand von 5Ω und von 15Ω . Es ist zu erkennen, daß die Oszillationen offenbar nur in einem bestimmten Parameterfenster auftreten, dort aber recht komplexe Abhängigkeiten aufweisen.

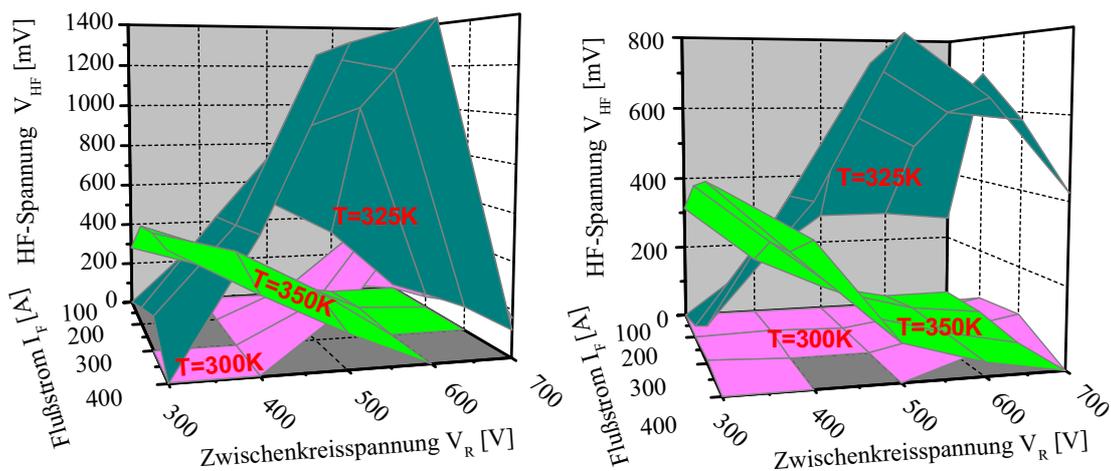


Fig. 4: Gemessene Spannung am HF-Sensor in Abhängigkeit von Zwischenkreisspannung, Flußstrom und Temperatur für einen Gatewiderstand von $R_G = 5\Omega$ (links) und $R_G = 15\Omega$ (rechts)

3 EMV-Abstrahlung

3.1 Meßaufbau

Das Auftreten sehr hochfrequenter Oszillationen während das Abschaltens von Leistungshalbleitern wird zu einer erhöhten elektromagnetischen Abstrahlung führen. Letztendlich besteht hier die Gefahr des Überschreitens der festgelegten Grenzwerte. Aus diesem Grunde wurde das Abstrahlungsverhalten gemessen, um zu einer besseren Abschätzung der emittierten Störungen zu gelangen und die Notwendigkeit der Vermeidung solcher Schwingungen zu verdeutlichen.

Die erlaubten Grenzwerte sowie die anzuwendenden Meßmethoden für ISM Geräte (umfaßt industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte, nicht aber Geräte im Bereich der Telekommunikation oder Traktion) sind im Europäischen Standard EN55011 (entspricht der internationalen Norm IEC CISPR 11) definiert [1]. Dieser Standard wurde weitestgehend für die Realisierung der Messungen berücksichtigt, in Anbetracht der Ziele der Messungen sowie der gegebenen Möglichkeiten waren jedoch einige Änderungen erforderlich:

- Die EMV-Messungen wurden in einem normalen, nicht geschirmten Meßlabor durchgeführt, um einen aufwendigen Transport des Schaltmeßplatzes zu vermeiden. Daher ist es erforderlich, eine sogenannte EMV-Umweltmessung durchzuführen, um vorhandene Störquellen (Mobiltelefone, Computer, Rundfunk etc.) zu erfassen
- Der Abstand zwischen Probe und Meßantenne wurde von 10m auf 3m reduziert, es wird jedoch nach wie vor das Fernfeld erfaßt
- Der in dem EMV-Messungen erfaßte Frequenzbereich wurde von den im Standard vorgesehenen 30MHz-1GHz auf 200MHz-3GHz abgeändert

Fig. 5 zeigt die genutzte Meßanordnung. Für die Messungen kamen ein Spektrumanalyser von Rohde&Schwarz Modell ESPI 3 und eine logarithmisch-periodische Antenne Model 3147 von der Firma EMCO zum Einsatz.

3.2 Ergebnisse der EMV-Messungen

Fig. 6 zeigt das Ergebnis der EMV-Umweltmessung, welche über einen Zeitraum von zwei Stunden durchgeführt wurde. Die in Fig. 6 eingefügten Farbbalken decken die Frequenzbereiche ab, welche Störquellen zugeordnet werden konnten. Als mit Abstand größte Störquellen sind hierbei Mobiltelefone auszumachen, daneben finden sich aber auch Signale, welche von Rundfunkstationen oder Bluetooth-Geräten verursacht werden.

Fig. 7 stellt das Ergebnis der EMV-Messungen für die beiden untersuchten Leistungsmodule dar. Pett-Oszillationen wurden nur beim Abschalten des Modules GAR gefunden. Die Schwingungen führen zu zwei scharfen Peaks im Frequenzspektrum bei 700MHz und 1.4GHz, welche der

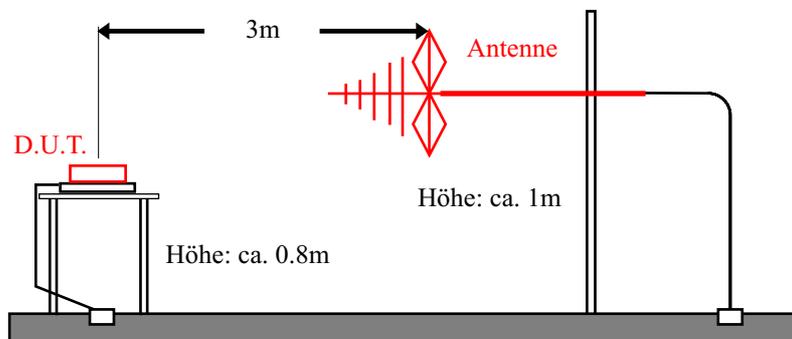


Fig. 5: Prinzipaufbau für die Durchführung der EMV-Messungen

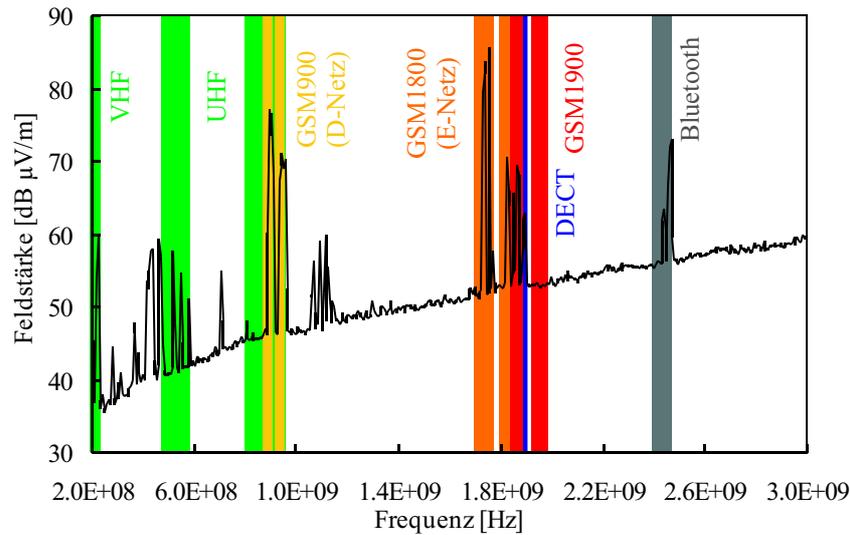


Fig. 6: Ergebnis der EMV-Umweltmessung

Grundschiwingung sowie der ersten Harmonischen zugeordnet werden können. Die durch die Pett-Schwingungen verursachten zusätzlichen Signale erreichen dabei eine Höhe von ungefähr $70\text{dB } \mu\text{V}/\text{m}$ und sind deutlich größer als die beim Schalten des Modules GAL gefundenen Störungen.

Anhand dieses Ergebnisses zeigt sich, daß Pett-Oszillationen in Leistungsmodulen vermieden werden müssen, da ein Auftreten dieser Schwingungen leicht zu einem Überschreiten der geforderten EMV-Grenzwerte führen kann. Dies wird um so deutlicher wenn in Betracht gezogen wird, daß in normalen leistungselektronischen Geräten eine Vielzahl dieser Leistungshalter eingesetzt wird und somit eine entsprechende Zunahme der abgestrahlten Störungen erwartet werden muß.

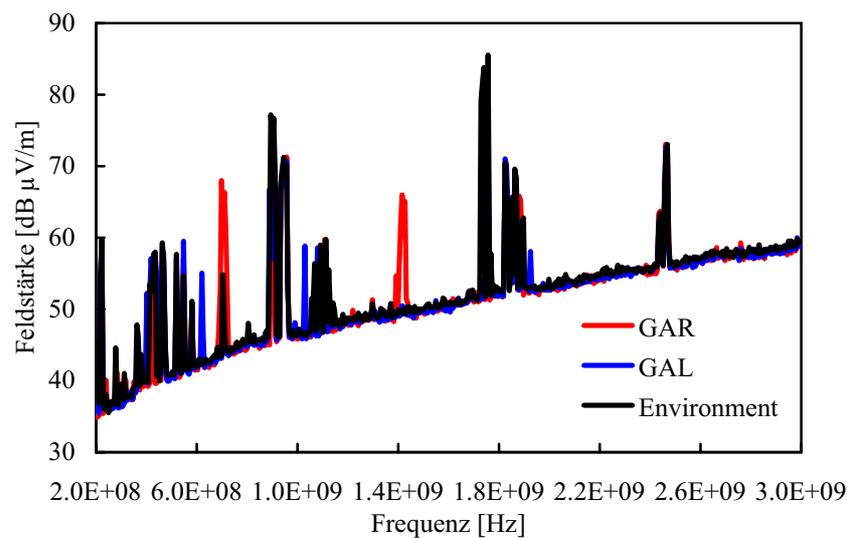


Fig. 7: Ergebnis der EMV-Messung ($V_R = 600\text{V}$, $I_F = 300\text{A}$, $T = 300\text{K}$, $R_G = 5\Omega$)

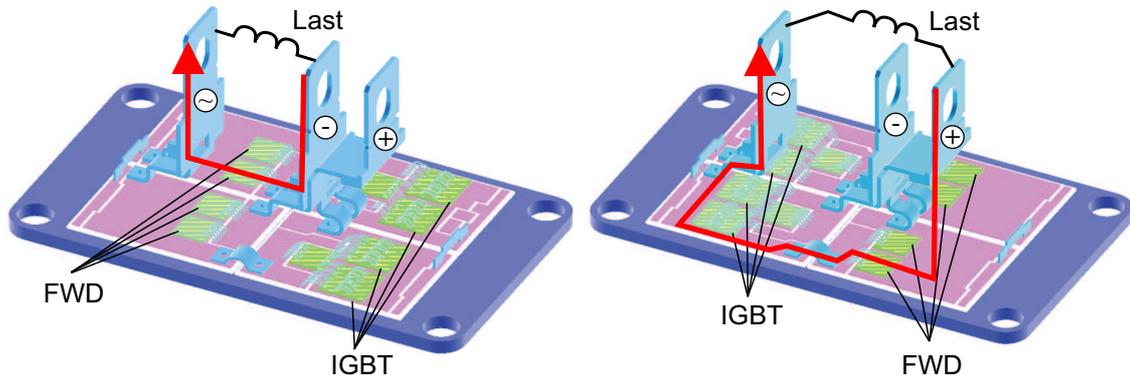


Fig. 8: Unterschiedlicher Stromfluß im Modul GAR (links) und GAL (rechts) während des Abkommutierens der Freilaufdioden

4 Maßnahmen zur Vermeidung von Pett-Oszillationen

Aufgrund der gezeigten Vielzahl von Abhängigkeiten, die letztendlich über das Auftreten von Pett-Oszillationen bestimmen, ist das Aufzeigen von Maßnahmen zur Vermeidung des Effekts kompliziert. Bekannte Möglichkeiten sind die Verwendung hochpermeabler Materialien zur Vergrößerung der Streuinduktivitäten [6] oder der Einsatz zusätzlicher direkter Querbonds zwischen den Chips zur Verringerung der Induktivitäten [7]. In beiden Fällen wird nachträglich Einfluß auf den Resonanzpunkt des Gesamtmodules genommen.

Generell betrachtet sollte jedoch dafür gesorgt werden, daß der vom Bauelement innerhalb des Betriebsbereiches durch Weite der Raumladungszone und Ladungsträger-Driftgeschwindigkeit vorgegebene mögliche Frequenzbereich für das Auftreten der Oszillationen nicht mit Resonanzpunkten des Gesamtmodules übereinstimmt. Eine Möglichkeit ist durch die Verwendung von 3D EMV-Simulatoren wie FLO/EMC der Firma Flomerics gegeben [3]. Dieser Simulator löst die kompletten Maxwell-Gleichungen und bietet die Möglichkeit, das Modell an einem bestimmten Punkt anzuregen und die Impedanz des Modules von diesem Punkt aus gesehen über den untersuchten Frequenzbereich zu berechnen.

Mit Hilfe dieses Simulators sollte herausgefunden werden, warum im Fall des Modules GAR Pett-Schwingungen auftreten, während im Modul GAL keine Oszillationen zu verzeichnen sind.

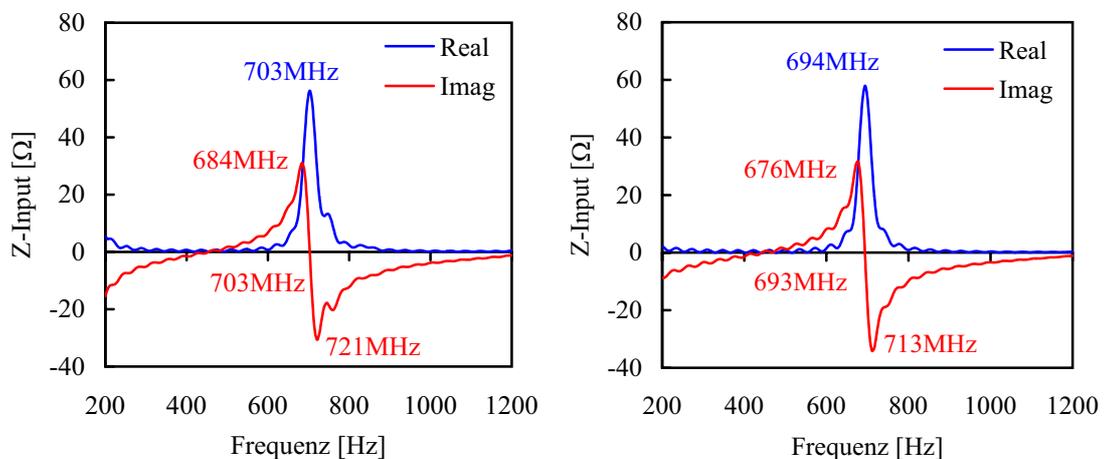


Fig. 9: Berechnete Impedanzverläufe für das Modul GAR (links) und GAL (rechts)

Obwohl der Aufbau beider Module zunächst ähnlich erscheint, ist der Weg des Stromflusses während des Abkommutierens der Freilaufdioden, wie in Fig. 8 gezeigt, deutlich verschieden. Anhand dessen läßt sich vermuten, daß die zusätzlichen vom Strom durchflossenen Flächen (kapazitiv) und Drahtbrücken (induktiv) bereits zu einer ausreichenden Verstimmung des Resonanzkreises führen und dies ausreicht, um die Schwingungen zu unterdrücken [5]. Die in Fig. 9 dargestellten Simulationsergebnisse können diese Vermutung jedoch vorerst nicht bestätigen. Für ein tiefergehendes Verständnis der tatsächlichen Ursachen sind daher noch weitere Arbeiten erforderlich.

Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung. DIN EN55011 - Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Hochfrequenzgeräte; Funkstörungen - Grenzwerte und Meßverfahren. VDE-Verlag Berlin, 2000.
- [2] B. Gutsmann, P. Mourick, and D. Silber. Plasma Extraction Transit Time Oscillations in Bipolar Power Devices. *Solid-State Electronics*, 46(1):133–138, 2002.
- [3] Flomerics Limited. *FLO/EMC Reference Manual*. Surrey, UK, 2003.
- [4] P. Mourick, B. Gutsmann, and D. Silber. Ultra High Frequency Oscillations in the Reverse Recovery Current of Fast Diodes. In *Proceedings ISPSD*, pages 205–208, Santa Fe, 2002.
- [5] R. Siemieniec, J. Lutz, and P. Mourick. Transit Time Oscillations as a Source of EMC Problems in Bipolar Power Devices. In *Proceedings EPE*, Toulouse, 2003.
- [6] Y. Takahashi, T. Koga, and K. Yoshikawa. 2.5kV/1.8kA Power Pack IGBT. In *ETG-Fachbericht 72*, pages 43–54, Bad Nauheim, 1998.
- [7] W. Zimmermann and K.H. Sommer. Patent DE 195490011C2, 1995.