ETH zürich

ETH Library

Some reliability aspects of IGBT modules for high-power applications

Doctoral Thesis

Author(s):
Ciappa, Mauro P.M.

Publication date:
2000

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-004042135

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. 13790

Some Reliability Aspects of IGBT Modules for High-Power Applications

A DISSERTATION

submitted to

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

For the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

Presented by

Mauro P. M. Ciappa

Dipl. Phys. University of Zurich

born January 13, 1961
citizen of Claro (TI), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Fichtner, examiner
Prof. Ing. F. Fantini, co-examiner

2000

Abstract

The assurance that a technical system will perform its intended function for the required duration and within a given environment requires a variety of engineering activities to be performed, which start from the project definition and continue during the whole life cycle. In the case of non-repairable systems this task is accomplished essentially by concurrent interdisciplinary efforts with the scope to contribute to the system architecture design, to select materials, processes, and components, as well to validate the selections made by means of tests, modeling, and analysis.

Present work deals with some aspects related to the reliability physics of Insulated Gate Bipolar Transistors (*IGBT*) for high power applications and it is organized in three main thematic sections.

In the first thematic section (*Chapter 2*) a compendium of failure mechanisms is presented, we observed to arise either during accelerated tests, or in field applications. The list mainly includes thermomechanical failure mechanisms, but it also refers to failure mechanisms, which result into burnout events. For every failure mechanism, we provided the failure modes, the physical or chemical process that leads to the failure, possible countermeasures, and where it applied also quantitative prediction models.

In the second thematic section (*Chapters 3* and *4*) physical and chemical techniques are presented, which have been specially adapted to the failure analysis and the to the thermal characterization of *IGBT* devices. Failure analysis methods include both non-destructive (e.g. electrical characterization) and destructive procedures (e.g. selective deprocessing). All techniques are illustrated in very detail and they are demonstrated

basing on real failure analysis case histories. Special attention has been paid to the preparation and to the selective delayering of the *IGBT* chip. The recipes and the working conditions of the chemical solutions we applied successfully for these processes are specially documented for enabling reproducibility. Due to the relevance of the junction temperature and of the junction temperature evolution in activating the most important failure mechanisms, two experimental techniques are presented for the quantitative characterization of this parameter. The first method is an application of the infrared microradiometry for temperature mapping at the steady state. In this case the sensitivity and the reproducibility of the technique have been improved by the use of a dedicated surface coating layer. The second method relates to an experimental set up we developed for acquiring the transient cooling curve of a single *IGBT* chip device. Because of the favorable experimental conditions the junction temperature measured in the steady state by both techniques has been demonstrated to agree within *10%*.

In the third thematic section (*Chapters 5* and *6*) two models have been developed for predicting the lifetime due to two specific failure mechanisms: time dependent dielectric breakdown (*TDDB*) and bond wire lift off. The model for *TDDB* assumes that extrinsic and intrinsic breakdown occur according to the formalism for two competing *Weibull* distributions. Basing on this assumption all relevant reliability parameters are derived analytically. Unlike the common *TDDB* models present approach is non-deterministic and enables to predict the failure rate even for the lowest quantiles of the distribution function. The dependence of the distribution parameters on the applied gate voltage has been derived from the invariant transforms of the *Weibull* distribution. The acceleration law has been validated with experimental data and it has been used for the optimization of screening procedures, in order to achieve the minimum yield loss. Finally, a model has been developed for the bond wire lift off mechanism, which predicts quantitatively the lifetime due to bond wire lift off in devices submitted to cyclic loads as they are encountered in current converters of railway systems. It assumes linear accumulation of the thermal-cycle fatigue damage, it is calibrated basing on data from accelerated tests, and it takes into account the redundancy of the bond wires within a complex multichip module.

Riassunto

Per assicurare che un sistema esegua la funzione richiesta durante un periodo stabilito e nelle condizioni ambientali fissate è necessario attuare tutta una serie di misure a partire dalla fase di progettazione e durante tutto il periodo di vita utile. Nel caso particolare di sistemi non riparabili, la realizzazione pratica di questa strategia passa essenzialmente per la definizione di un'architettura di sistema robusta, per la scelta corretta dei materiali, dei processi e dei componenti, come pure per la valutazione dei prototipi mediante adeguate prove di collaudo, analisi di guasto e modellizzazioni. Tutto questo richiede il concorso di numerose discipline tecniche e scientifiche.

In questo lavoro vengono trattati alcuni aspetti della fisica dell'affidabilità relativi ai componenti noti come Integrated Gate Bipolar Transistor (*IGBT*) utilizzati per applicazioni di alta potenza. La trattazione seguente è suddivisa in tre ambiti tematici.

Nella prima parte (*Capitolo 2*) si presenta un compendio di meccanismi di guasto osservati a seguito di prove accelerate e di collaudi in campo. In aggiunta ai meccanismi in prevalenza di origine termomeccanica, vengono trattati anche alcuni meccanismi di guasto intrinseci. Per ogni meccanismo di guasto sono stati specificati i sintomi caratteristici, i processi fisici o chimici che ne stanno alla base, eventuali contromisure tecnologiche e ove la cosa fosse possibile anche modelli per la predizione del tempo di vita.

Nella seconda parte (*Capitoli 3 e 4*) vengono trattate quelle tecniche di caratterizzazione chimico-fisica che son state specificamente adattate alle esigenze dell'analisi di guasto e della termometria negli *IGBT*. Esse includono metodiche non-distruttive (*p.e.* la caratterizzazione elettrica) e metodiche distruttive (*p.e.* deprocessamento del chip). Le tecniche sono discusse in dettaglio e vengono illustrate sulla base di casi reali di analisi di guasto. E' stata prestata particolare attenzione alle tecniche di preparazione del semiconduttore e agli attacchi selettivi per i diversi strati del chip. La composizione e le condizioni di utilizzazione delle diverse

soluzioni chimiche sono state documentate dettagliatamente in modo da garantire la riproducibilità dei risultati. In considerazione dell'importantanza della temperatura di giunzione nell'attivazione dei principali meccanismi di guasto, vengono presentate due metodiche specifiche per la determinazione quantitativa di questo parametro. La prima tecnica è un'applicazione della microradiometria infrarossa per l'acquisizione di mappe di temperatura di *IGBT* all'equilibrio termico. In questo caso la sensibilità e la riproducibilità della metodica sono state di molto migliorate rispetto alle prestazioni standard, grazie allo sviluppo di una particolare vernice per l'equalizzazione dell'emissività dei diversi materiali. La seconda tecnica utilizza un banco di prova appositamente progettato per l'acquisizione del transitorio di raffreddamento negli *IGBT*. Si è potuto dimostrare che, grazie alle condizioni sperimentali favorevoli, le temperature di giunzione misurate con entrambe i metodi non si discostano di più del *10%*.

Nella terza parte (*Capitoli 5* e *6*) sono stati elaborati due modelli per predire il tempo di vita di un dispositivo a seguito di due meccanismi di guasto specifici: la rottura del dielettrico ad alti campi (*TDDB*) e il distacco dei fili di alluminio (*bond wire lift off*). Nel modello proposto per il *TDDB* si presuppone che entrambe i meccanismi di breakdown intrinseco ed estrinseco siano descritti dal formalismo relativo alla competizione di due distribuzioni di *Weibull*. Questo assunto consente di derivare analiticamente i principali parametri affidabilistici. Contrariamente ai modelli tradizionali, quello proposto non è deterministico e consente di calcolare il tasso di guasto anche per i primi quantili della distribuzione cumulativa. Inoltre, la dipendenza dalla tensione di gate dei parametri della distribuzione cumulativa è ricavata a partire dalle trasformazioni invarianti della distribuzione di *Weibull*. Le leggi di accelerazione ottenute in questo modo sono state validate mediante dati sperimentali e sono state inseguito applicate per ottimizzare i processi di setacciatura in modo da rendere massima la resa, riducendo al minimo gli scarti. Infine è stato messo a punto un modello per la predizione di vita per il meccanismo del distacco dei fili (*bond wire lift off*) in *IGBT* sottoposti a cicli termici rappresentativi di quelli incontrati in convertitori per sistemi di trazione ferroviaria. Il modello assume che il danneggiamento prodotto dalla fatica termomeccanica sia accumulato in modo lineare e tiene in debita considerazione la struttura ridondante dei fili all'interno di un modulo complesso.