
Table des matières

Avant-propos	15
Chapitre 1. Essais hautement accélérés associant température, vibrations et humidité.	19
Philippe PUGNET, Pierre Richard DAHOO et Jean-Loup ALVAREZ	
1.1. Introduction.	20
1.2. Caractéristiques des sollicitations générées par le système Super HAT	21
1.3. Description du système Super HAT	22
1.3.1. Configuration du système	22
1.3.2. Système de pilotage et de supervision	24
1.3.3. Plan de test	25
1.3.4. Servitudes	27
1.4. Application	28
1.4.1. Dispositif sous test	28
1.4.2. Fixation du DST sur la table de la chambre HAT	29
1.4.3. Recherche des limites de fonctionnement en température	30
1.4.3.1. Recherche des limites de fonctionnement en basse température.	30
1.4.3.2. Recherche des limites de fonctionnement en haute température.	32
1.4.4. Recherche des faiblesses aux variations rapides de température.	32
1.4.5. Recherche des limites en vibrations aléatoires	32
1.4.6. Etude des limites aux sollicitations associant variations rapides de température et vibrations aléatoires	36
1.4.7. Etude des faiblesses aux sollicitations associant variations rapides de température et humidité	36

1.4.8. Etude des limites de robustesse à des sollicitations associant variations rapides de température, humidité et vibrations aléatoires . . .	36
1.4.9. Etude de la robustesse aux contraintes thermiques des blocs fonctionnels assurant la compatibilité électromagnétique . . .	40
1.4.9.1. Emissions conduites	40
1.4.9.2. Emissions rayonnées	43
1.5. Conclusion	43
1.6. Bibliographie	43

Chapitre 2. Banc de vieillissement de transistors en conditions opérationnelles 45

Pascal DHERBECOURT, Olivier LATRY, Karine DEHAIS-MOURGUES,
Jean-Baptiste FONDER, Cédric DUPERRIER, Farid TEMCAMANI,
Hichame MAANANE et Jean-Pierre SIPMA

2.1. Introduction	45
2.2. Vieillissement des composants électroniques hyperfréquences en conditions opérationnelles	46
2.2.1. Définition du cahier des charges pour la construction du banc	46
2.2.2. Génération des contraintes et mesures des paramètres du vieillissement	47
2.2.3. Caractérisation statique en mode I-V pulsé <i>in situ</i>	51
2.2.4. Mesures des paramètres S <i>in situ</i>	54
2.2.5. Dispositif de mise en condition de démarrage à froid.	54
2.3. Application à l'étude de composants de puissance.	56
2.3.1. Etude de la fiabilité des transistors de puissance hyperfréquences LDMOS 330 W en conditions opérationnelles de fonctionnement.	56
2.3.2. Vieillissement accéléré de transistors LDMOS 330 W	57
2.3.2.1. Description de la procédure expérimentale.	58
2.3.2.2. Analyse des résultats expérimentaux	58
2.3.2.3. Discussion	61
2.3.2.4. Modélisation analytique	62
2.3.3. Essais d'endurance à froid sur transistors LDMOS 330 W	64
2.3.3.1. Contexte de l'étude.	64
2.3.3.2. Description du montage	65
2.3.3.3. Etude du comportement thermique du transistor	66
2.3.3.4. Vieillissement en mode impulsionnel : résultats et analyse	67
2.3.3.5. Fonctionnement en mode impulsions longues	67
2.3.3.6. Fonctionnement en mode impulsions courtes	67
2.3.3.7. Analyse des résultats pour mesure de robustesse à froid.	68
2.4. Conclusion	69
2.5. Bibliographie	69

Chapitre 3. Analyse des défauts physiques des systèmes mécatroniques . . .	71
Christian GAUTIER, Eric PIERAERTS et Olivier LATRY	
3.1. Introduction.	71
3.2. Equipements et méthodologie de l'analyse de défaillance des systèmes mécatroniques.	73
3.2.1. Ouverture des boîtiers céramiques et enrobés de résine	73
3.2.2. Equipement et technique pour la détection et la localisation des défauts	76
3.3. Analyse des défauts physiques	78
3.3.1. Analyse d'un composant IGBT après essai hautement accélééré.	78
3.3.1.1. Conditions d'essai et constat	79
3.3.1.2. Analyse par rayons X	80
3.3.1.3. Analyse électrique	80
3.3.1.4. Analyse par microscopie optique	82
3.3.1.5. Analyse thermique	82
3.3.2. Analyse d'un composant MOSFET après tests sur le banc de surtension électrique	84
3.3.2.1. Analyse de construction et décapsulation	84
3.3.2.2. Analyse de défaillance par microscopie optique	86
3.3.3. Analyse d'un composant GaN50W–HEMT après test sur banc de fiabilité.	86
3.3.3.1. Caractéristiques de l'amplificateur et conditions expérimentales de vieillissement.	86
3.3.3.2. Microscopie par émission de photons.	88
3.3.3.3. Analyses en microscopie électronique en transmission	91
3.3.4. Analyse d'un composant LDMOS après test HTOL-RF	92
3.3.4.1. Ouverture du LDMOS 300 W capot céramique	95
3.3.4.2. Emissions de photons	95
3.4. Conclusion	97
3.5. Bibliographie.	98
Chapitre 4. Effet de défauts lacunaires dans les matériaux d'interconnexion	99
Pierre Richard DAHOO, Malika KHETTAB, Christian CHONG, Armelle GIRARD et Philippe POUGET	
4.1. Introduction.	100
4.2. Transferts thermiques et thermoélasticité	102
4.2.1. Conduction	103
4.2.2. Convection	103
4.2.3. Rayonnement	104

4.2.4. Equation de diffusion de la chaleur	104
4.2.5. Thermomécanique et thermoélasticité	105
4.3. Description de la méthode numérique	110
4.4. Simulation des effets thermiques et thermomécaniques du matériau d'interconnexion d'un module électronique.	112
4.4.1. Variation de la température et de la déformation en présence d'un défaut lacunaire	114
4.4.2. Températures maximales en fonction de la tension ou de la taille du défaut	115
4.4.3. Etude de l'effet des défauts lacunaires en taille et en position dans les MIC	117
4.4.4. Etude de l'effet de la disposition des défauts lacunaires dans les MIC	119
4.4.5. Effets thermomécaniques sur les matériaux d'un module mécatronique de puissance	120
4.4.6. Analyse des résultats	121
4.5. Conclusion	122
4.6. Bibliographie	122
Chapitre 5. Modélisation électro-thermomécanique de systèmes mécatroniques	125
Abderahman MAKHLOUFI, Younes AOUES et Abdelkhalak EL HAMI	
5.1. Introduction.	125
5.2. Théorie du couplage électro-thermomécanique.	126
5.2.1. Mise en équation du problème thermique.	126
5.2.1.1. Equation de chaleur en milieu isotrope	126
5.2.1.2. Transfert de chaleur par conduction.	127
5.2.1.3. Transfert de chaleur par convection.	129
5.2.2. Phénomènes électrothermiques	130
5.2.3. Formulation numérique du couplage électro-thermomécanique	131
5.2.3.1. Couplage électrothermique	132
5.2.3.2. Couplage thermomécanique	133
5.2.3.3. Couplage électro-thermomécanique.	135
5.3. Simulation par la méthode des éléments finis du comportement électro-thermomécanique	136
5.3.1. Couplage fort de la modélisation électro-thermomécanique.	138
5.3.2. Couplage faible de la modélisation électro-thermomécanique	138
5.4. Exemple de simulation électro-thermomécanique d'un transistor TBH.	139
5.4.1. Modèle global	140

5.4.1.1. Modélisation numérique des effets de serrage sur le comportement de la semelle	140
5.4.1.2. Modélisation globale de l'amplificateur HPA	142
5.4.2. Modèle local du transistor HBT	143
5.5. Analyse modale des composants mécatroniques	147
5.5.1. Mise en équation du problème vibratoire	147
5.5.2. Formulation variationnelle	148
5.5.3. Approximation par éléments finis	148
5.5.4. Résolution dans le domaine fréquentiel	150
5.5.4.1. Calcul des fréquences propres (analyse modale)	150
5.5.4.2. Calcul de la fonction de réponse en fréquence.	151
5.6. Analyse modale stochastique des structures.	151
5.7. Identification numérique des paramètres élastiques des composants électroniques.	152
5.8. Exemple de modélisation et simulation du comportement vibratoire des composants mécatroniques.	154
5.9. Conclusion	161
5.10. Listes des abréviations et des symboles	162
5.11. Bibliographie	163
Chapitre 6. Création de métamodèle	165
Bouzid AIT-AMIR, Philippe POUGET et Abdelkhalak EL HAMI	
6.1. Introduction.	165
6.2. Notion de métamodèle	166
6.3. Sélection des facteurs : définition du plan de criblage ou <i>screening</i>	166
6.4. Création de plans d'expérience	168
6.4.1. Plans centraux composites (CC)	169
6.4.2. Plans de Box et Behnken	171
6.4.3. Plans D-Optimaux	172
6.4.4. Plans de Doehlert	173
6.4.5. Plans <i>Latin Hypercube Sampling</i>	174
6.5. Modélisation de la surface de réponse : régression PLS et krigeage	176
6.5.1. Régression PLS	176
6.5.2. Le krigeage.	178
6.5.3. Comparaison de modèle	180
6.6. Analyse de sensibilité du modèle : décomposition de la variance, le critère de Sobol.	182
6.6.1. Principe.	182
6.6.2. Application à un modèle de krigeage	184
6.7. Conception robuste	185

6.8. Conclusion	189
6.9. Bibliographie	190
Chapitre 7. Optimisation fiabiliste des systèmes électroniques embarqués	191
Younes AOUES, Abderahman MAKHLOUFI et Abdelkhalak EL HAMI	
7.1. Introduction	191
7.2. La modélisation physico-probabiliste	193
7.2.1. Les méthodes de l'analyse de fiabilité des structures	195
7.2.2. Méthode des simulations Monte-Carlo	198
7.2.2.1. Simulation de Monte-Carlo pour l'estimation des moments statistiques	198
7.2.2.2. Simulation de Monte-Carlo pour l'analyse de fiabilité.	199
7.2.3. Modélisation probabiliste du joint de brasure en fatigue thermique	199
7.2.3.1. Méthodologie et démarche adoptée	200
7.2.3.2. Principaux résultats	203
7.3. Méthodologie de l'optimisation fiabiliste	205
7.3.1. Formulations de la RBDO	207
7.3.2. Approche RIA (<i>Reliability Index Approach</i>)	208
7.3.3. Approche SORA (<i>Sequential Optimization and Reliability Assessment</i>)	208
7.3.4. Optimisation fiabiliste en utilisant une surface de réponse.	210
7.4. Optimisation fiabiliste des couches de matériaux des modules de puissance HBT.	211
7.4.1. Modèle éléments finis de la carte HPA	213
7.4.2. Formulation du problème d'optimisation déterministe et fiabiliste du HPA	215
7.4.3. Principaux résultats	217
7.5. Conclusion	219
7.6. Bibliographie	219
Chapitre 8. Architecture haut rendement d'amplificateurs de puissance	221
Farid TEMCAMANI, Jean-Baptiste FONDER, Cédric DUPERRIER et Olivier LATRY	
8.1. Introduction	221
8.2. Méthodologie	222
8.3. Tests de vieillissement	223
8.3.1. Protocole des essais	223
8.3.2. Impact du régime RF pulsé sur le courant de repos I_{D0}	224

8.4. Autres résultats	225
8.4.1. Suivi des performances	225
8.4.2. Caractérisations RF	226
8.4.3. Mesures statiques	228
8.5. Discussion sur l'origine des dégradations	230
8.6. Analyses physiques	231
8.6.1. Descriptif	231
8.6.2. Observation visuelle	232
8.6.3. Localisation des défauts par des techniques non destructives	233
8.6.4. Analyse microstructurale des dégradations : TEM et FIB	233
8.7. Règles de conception des amplificateurs.	236
8.7.1. Vers des amplificateurs à haut rendement	236
8.7.2. Introduction de la fiabilité directement dans le modèle du composant	237
8.8. Conclusion	239
8.9. Bibliographie	239
Index	243