

Table des matières

Avant-propos	1
Chapitre 1. Essais hautement accélérés associant température, vibrations et humidité	5
Philippe POUQUET, Pierre Richard DAHOO et Jean-Loup ALVAREZ	
1.1. Introduction	6
1.2. Caractéristiques des sollicitations générées par le système Super HAT	7
1.3. Description du système Super HAT	8
1.3.1. Configuration du système	8
1.3.2. Système de pilotage et de supervision	10
1.3.3. Plan de test	11
1.3.4. Servitudes	13
1.4. Application	14
1.4.1. Dispositif sous test	14
1.4.2. Fixation du DST sur la table de la chambre HAT	15
1.4.3. Recherche des limites de fonctionnement en température	16
1.4.3.1. Recherche des limites de fonctionnement en basse température	16
1.4.3.2. Recherche des limites de fonctionnement en haute température	18
1.4.4. Recherche des faiblesses aux variations rapides de température	18
1.4.5. Recherche des limites en vibrations aléatoires	19
1.4.6. Etude des limites aux sollicitations associant variations rapides de température et vibrations aléatoires	22
1.4.7. Etude des faiblesses aux sollicitations associant variations rapides de température et humidité	22

1.4.8. Etude des limites de robustesse à des sollicitations associant variations rapides de température, humidité et vibrations aléatoires . . .	22
1.4.9. Etude de la robustesse aux contraintes thermiques des blocs fonctionnels assurant la compatibilité électromagnétique	26
1.4.9.1. Emissions conduites	29
1.4.9.2. Emissions rayonnées	29
1.5. Conclusion	29
1.6. Bibliographie	29

Chapitre 2. Banc de vieillissement de transistors en conditions opérationnelles 31

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

2.1. Introduction	31
2.2. Vieillissement des composants électroniques hyperfréquences en conditions opérationnelles	32
2.2.1. Définition du cahier des charges pour la construction du banc . .	32
2.2.2. Génération des contraintes et mesures des paramètres du vieillissement	33
2.2.3. Caractérisation statique en mode I-V pulsé <i>in situ</i>	37
2.2.4. Mesures des paramètres <i>S in situ</i>	40
2.2.5. Dispositif de mise en condition de démarrage à froid.	40
2.3. Application à l'étude de composants de puissance.	42
2.3.1. Etude de la fiabilité des transistors de puissance hyperfréquences LDMOS 330 W en conditions opérationnelles de fonctionnement. . .	42
2.3.2. Vieillissement accéléré de transistors LDMOS 330 W	43
2.3.2.1. Description de la procédure expérimentale.	44
2.3.2.2. Analyse des résultats expérimentaux	44
2.3.2.3. Discussion	47
2.3.2.4. Modélisation analytique.	48
2.3.3. Essais d'endurance à froid sur transistors LDMOS 330 W	50
2.3.3.1. Contexte de l'étude.	50
2.3.3.2. Description du montage	51
2.3.3.3. Etude du comportement thermique du transistor	52
2.3.3.4. Vieillissement en mode impulsionnel : résultats et analyse .	53
2.3.3.5. Fonctionnement en mode impulsions longues	53
2.3.3.6. Fonctionnement en mode impulsions courtes	53
2.3.3.7. Analyse des résultats pour mesure de robustesse à froid. . .	54
2.4. Conclusion	55
2.5. Bibliographie	55

Chapitre 3. Analyse des défauts physiques des systèmes mécatroniques 57

Christian GAUTIER, Eric PIERAERTS et Olivier LATRY

3.1. Introduction	57
3.2. Equipements et méthodologie de l'analyse de défaillance des systèmes mécatroniques.	59
3.2.1. Ouverture des boîtiers céramiques et enrobés de résine	59
3.2.2. Equipement et technique pour la détection et la localisation des défauts	62
3.3. Analyse des défauts physiques	64
3.3.1. Analyse d'un composant IGBT après essai hautement accéléré.	64
3.3.1.1. Conditions d'essai et constat	65
3.3.1.2. Analyse par rayons X	66
3.3.1.3. Analyse électrique	66
3.3.1.4. Analyse par microscopie optique	68
3.3.1.5. Analyse thermique	68
3.3.2. Analyse d'un composant MOSFET après tests sur le banc de surtension électrique	70
3.3.2.1. Analyse de construction et décapsulation	70
3.3.2.2. Analyse de défaillance par microscopie optique	72
3.3.3. Analyse d'un composant GaN50W–HEMT après test sur banc de fiabilité	72
3.3.3.1. Caractéristiques de l'amplificateur et conditions expérimentales de vieillissement.	72
3.3.3.2. Microscopie par émission de photons.	74
3.3.3.3. Analyses en microscopie électronique en transmission	77
3.3.4. Analyse d'un composant LDMOS après test HTOL-RF	81
3.3.4.1. Ouverture du LDMOS 300 W capot céramique	81
3.3.4.2. Emissions de photons	82
3.4. Conclusion	83
3.5. Bibliographie	84

Chapitre 4. Effet de défauts lacunaires dans les matériaux d'interconnexion 85

Pierre Richard DAHOO, Malika KHETTAB, Christian CHONG, Armelle GIRARD et Philippe POUUNET

4.1. Introduction.	86
4.2. Transferts thermiques et thermoélasticité	88
4.2.1. Conduction	89
4.2.2. Convection	89

4.2.3. Rayonnement	90
4.2.4. Equation de diffusion de la chaleur	90
4.2.5. Thermomécanique et thermoélasticité	91
4.3. Description de la méthode numérique	96
4.4. Simulation des effets thermiques et thermomécaniques du matériau d'interconnexion d'un module électronique	98
4.4.1. Variation de la température et de la déformation en présence d'un défaut lacunaire	100
4.4.2. Températures maximales en fonction de la tension ou de la taille du défaut	101
4.4.3. Etude de l'effet des défauts lacunaires en taille et en position dans les MIC	103
4.4.4. Etude de l'effet de la disposition des défauts lacunaires dans les MIC	105
4.4.5. Effets thermomécaniques sur les matériaux d'un module mécatronique de puissance	106
4.4.6. Analyse des résultats	107
4.5. Conclusion	108
4.6. Bibliographie	108

Chapitre 5. Modélisation électro-thermomécanique de systèmes mécatroniques 111

Abderahman MAKHLOUFI, Younes AOUES et Abdelkhalak EL HAMI

5.1. Introduction	111
5.2. Théorie du couplage électro-thermomécanique	112
5.2.1. Mise en équation du problème thermique	112
5.2.1.1. Equation de chaleur en milieu isotrope	112
5.2.1.2. Transfert de chaleur par conduction	113
5.2.1.3. Transfert de chaleur par convection	115
5.2.2. Phénomènes électrothermiques	116
5.2.3. Formulation numérique du couplage électro-thermomécanique	117
5.2.3.1. Couplage électrothermique	118
5.2.3.2. Couplage thermomécanique	119
5.2.3.3. Couplage électro-thermomécanique	121
5.3. Simulation par la méthode des éléments finis du comportement électro-thermomécanique	122
5.3.1. Couplage fort de la modélisation électro-thermomécanique	124
5.3.2. Couplage faible de la modélisation électro-thermomécanique	124
5.4. Exemple de simulation électro-thermomécanique d'un transistor TBH	125
5.4.1. Modèle global	126

5.4.1.1. Modélisation numérique des effets de serrage sur le comportement de la semelle	126
5.4.1.2. Modélisation globale de l'amplificateur HPA	128
5.4.2. Modèle local du transistor HBT	130
5.5. Analyse modale des composants mécatroniques	133
5.5.1. Mise en équation du problème vibratoire	133
5.5.2. Formulation variationnelle	134
5.5.3. Approximation par éléments finis	135
5.5.4. Résolution dans le domaine fréquentiel	137
5.5.4.1. Calcul des fréquences propres (analyse modale)	137
5.5.4.2. Calcul de la fonction de réponse en fréquence.	137
5.6. Analyse modale stochastique des structures.	137
5.7. Identification numérique des paramètres élastiques des composants électroniques.	139
5.8. Exemple de modélisation et simulation du comportement vibratoire des composants mécatroniques.	140
5.9. Conclusion	147
5.10. Listes des abréviations et des symboles	148
5.11. Bibliographie	149

Chapitre 6. Création de métamodèles 151

Bouzid AIT-AMIR, Philippe POUUNET et Abdelkhalak EL HAMI

6.1. Introduction.	151
6.2. Notion de métamodèle	152
6.3. Sélection des facteurs : définition du plan de criblage ou <i>screening</i>	152
6.4. Création de plans d'expériences.	154
6.4.1. Plans centraux composites (CC)	155
6.4.2. Plans de Box et Behnken	158
6.4.3. Plans D-optimaux	159
6.4.4. Plans de Doehlert	159
6.4.5. Plans Latin Hypercube Sampling.	160
6.5. Modélisation de la surface de réponse : régression PLS et krigeage	162
6.5.1. Régression PLS	162
6.5.2. Krigeage	164
6.5.3. Comparaison de modèles	166
6.6. Analyse de la sensibilité du modèle : décomposition de la variance, critère de Sobol	169
6.6.1. Principe.	169
6.6.2. Application à un modèle de krigeage	170
6.7. Conclusion	175
6.8. Bibliographie.	176

Chapitre 7. Etude probabiliste et optimisation de la brasure 177

Bouchaïb RADI, Nadia SAADOUNE et Abdelkhalak EL HAMI

7.1. Introduction	177
7.2. Les équipements électroniques	178
7.2.1. Circuit imprimé	178
7.2.2. Composants électroniques	179
7.2.3. Brasures	179
7.2.4. Alliage de brasage	180
7.3. Modélisation thermique de la carte électronique	182
7.3.1. Conditions aux limites	182
7.3.2. Modélisation de la brasure d'un composant électronique	183
7.3.2.1. Modèle de simulation	183
7.4. Etude probabiliste du comportement de la brasure.	189
7.4.1. Méthodes de conception probabiliste	189
7.4.1.1. Simulation de Monte-Carlo	189
7.4.1.2. Méthodes d'analyse des surfaces de réponse	190
7.4.2. Etude de la probabilité des propriétés des matériaux	190
7.4.2.1. Module de Young	191
7.4.2.2. Coefficient de dilatation thermique (CTE).	191
7.4.3. Analyse de la variabilité des propriétés des matériaux	193
7.5. Optimisation de la brasure	194
7.5.1. Optimisation multi-objectif (MOO)	195
7.5.2. Optimisation à l'aide des métamodèles	196
7.5.2.1. Méthodologie des surfaces de réponse (RSM).	196
7.5.3. Méthodes d'optimisation des structures	198
7.5.3.1. Optimisation de conception.	198
7.5.3.2. Optimisation de forme.	199
7.5.3.3. Modèle de simulation	200
7.6. Conclusion	202
7.7. Bibliographie	202

Chapitre 8. Architecture haut rendement d'amplificateurs de puissance 205

Farid TEMCAMANI, Jean-Baptiste FONDER, Cédric DUPERRIER et Olivier LATRY

8.1. Introduction	205
8.2. Méthodologie.	206
8.3. Tests de vieillissement	207

8.3.1. Protocole des essais.	207
8.3.2. Impact du régime RF pulsé sur le courant de repos I_{D0}	208
8.4. Autres résultats.	209
8.4.1. Suivi des performances	209
8.4.2. Caractérisations RF.	210
8.4.3. Mesures statiques	212
8.5. Discussion sur l'origine des dégradations	214
8.6. Analyses physiques	215
8.6.1. Descriptif.	215
8.6.2. Observation visuelle	216
8.6.3. Localisation des défauts par des techniques non destructives	217
8.6.4. Analyse microstructurale des dégradations : TEM et FIB	217
8.7. Règles de conception des amplificateurs.	220
8.7.1. Vers des amplificateurs à haut rendement	220
8.7.2. Introduction de la fiabilité directement dans le modèle du composant	221
8.8. Conclusion	223
8.9. Bibliographie.	223

Chapitre 9. Analyse de la fiabilité basée sur les métamodèles des boîtiers à échelle de puce (CSP) 227

Hamid HAMDANI, Bouchaïb RADi et Abdelkhalak EL HAMI

9.1. Introduction.	227
9.2. Description du packaging CSP étudié	229
9.3. Métamodélisation et analyse de fiabilité.	230
9.3.1. Métamodèle de krigeage.	230
9.3.2. Méthode probabiliste basée sur les métamodèles pour l'évaluation de fiabilité	232
9.4. Analyse probabiliste de la fiabilité des assemblages CSP.	233
9.4.1. Simulation déterministe par MEF du CSP	233
9.4.1.1. Modèle éléments finis des joints de brasure	233
9.4.1.2. Propriétés des matériaux	235
9.4.1.3. Modèle de prédiction de la durée de vie en fatigue	238
9.4.1.4. Résultats déterministes et discussion	239
9.4.2. Incertitudes dans les T-CSP	241
9.4.3. Construction du métamodèle	242
9.4.3.1. Plan d'expériences	242
9.4.3.2. Validation du métamodèle	243
9.4.4. Simulation de Monte-Carlo basée sur le métamodèle.	245

9.5. Conclusion	248
9.6. Bibliographie	248
Liste des auteurs	251
Index	253
Sommaire de <i>Les systèmes mécatroniques embarqués 1</i>	257