



UCL - Université catholique de Louvain
Faculté des Sciences
Département de Physique

Radiation damage induced by neutrons in CMS silicon sensors

Eric Forton

Promoteur: Prof. Ghislain Grégoire

Dissertation présentée pour obtenir le titre de
Docteur en Sciences

Louvain-la-Neuve, mars 2006

C'est déjà la troisième fois que je commence des remerciements en citant le professeur Ghislain Grégoire. Je tiens vivement à le remercier et à souligner le rôle capital qu'il a joué dans ma formation depuis maintenant presque sept ans.

Je voudrais aussi remercier collectivement les membres constituant mon jury pour les commentaires très complémentaires dont ils m'ont fait part. En particulier, je me réjouis de compter le Professeur Frank Hartmann parmi ces membres : l'équipe de Karlsruhe fut d'une aide certaine lors de la mise en route du dispositif de mesure réalisé autour de la probe station.

Ce travail est avant tout expérimental. La mise au point des dispositifs de mesure n'aurait pu se faire sans l'aide des ateliers de mécanique et d'électronique dont l'expérience et le feeling est inestimable. Parce que la collaboration fut plus étroite avec eux, je citerai Willy, Bernard, Dominique, Pierre, Luc ou Jean-Marc. Travailler avec eux fut toujours un réel plaisir.

Un dispositif d'irradiation n'est rien sans faisceau ! Les « nôtres » sont en général très stables grâce à toute l'équipe du cyclotron. Je tiens aussi à présenter mes excuses à ceux que j'ai réveillés lors certaines irradiations parce que « ça a sauté ».

Pour avoir travaillé ensembles pendant toute la durée de nos thèses, Samia reçoit évidemment toute ma sympathie. Heureusement que nous pouvions compter l'un sur l'autre pour assurer les gardes lors des longues nuits auprès du cyclotron et réaliser à tour de rôle les mesures avec la probe station ! Nous avons pu profiter à l'occasion du dévouement de Guillaume, Muriel, Christophe et Otilia lors de certains shifts. Je tenais à les en remercier... Et surtout j'espère n'oublier personne tant le temps peut paraître long sur le coup des 4-5 h du matin !

Terminer la rédaction de cette thèse me donne l'occasion de constater que ces dernières années furent riches d'expériences et de rencontres en tous genres. Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à cela.

Dans ce contexte, je ne peux pas terminer sans remercier Papa, Maman, Patricia et Gaëlle. Les deux premiers parce qu'il m'est impossible de même dresser la liste de ce qu'ils ont fait pour moi (ils seront soulagés de me voir terminer), les deux dernières... Juste « parce que » !

Table of contents

Table of contents	4
Introduction	7
Chapter 1 : CMS and the LHC	9
1.1. The LHC	9
1.2. Zoom on CMS	13
1.2.1. The CMS tracker	17
1.2.2. Radiative environment in the CMS Tracker	24
Chapter 2 : Silicon detectors	27
2.1. Properties of the crystal	27
2.2. Principle of operation, characteristics	29
2.2.1. Charge collection and position resolution	34
2.2.2. Electrical properties of a strip detector	35
2.3. Radiation-induced changes in detector properties	38
2.3.1. Basic damage process	39
2.3.2. The NIEL hypothesis	40
2.3.3. Evolution of detector properties	43
2.3.4. Correlations between microscopic defects and macroscopic properties	48
2.3.5. Comments on bias and irradiation rate	50
2.4. CMS sensors designs	51
2.5. Qualification procedure for the CMS tracker sensors	55
Chapter 3 : Experimental setups	59
3.1. Electrical characterisation setup	59
3.1.1. Instrumentation, acquisition program	59
3.1.2. Performances, measurement accuracy	63
3.1.3. Encountered Problems	66
3.1.4. Cross calibration with the Karlsruhe system	69
3.2. The T2 beam line and instruments around the irradiation zone	72
3.2.1. The High flux neutron beam line	73
3.2.2. Sensor environment, cold box	76
3.2.3. Sensor biasing	79
3.2.4. Acquisition and monitoring	83
3.3. Sensor test protocol in Louvain	84
3.4. Summary	86

Chapter 4 : Evolution under irradiation	89
4.1. Experimental neutron hardness factors	89
4.1.1. Diodes description, pre-irradiation qualification	90
4.1.2. Monoenergetic neutron beam line (“Q” beam line)	91
4.1.3. Principle of the test	93
4.1.4. Post-irradiation measurements and calculations	96
4.1.5. Summary and comparison with literature	99
4.2. Analysis of CMS test structures	101
4.2.1. The impact of bulk biasing during irradiation	103
4.2.2. Summary of the irradiation results	112
Conclusions	127
Annexes	129
A.1. Dosimetry and fluence calculations	129
A.1.1. Beam monitor	129
A.1.2. Activation	131
A.1.3. Alanine	134
A.2. Thermal treatment of the sensors: annealing oven	141
A.2.1. Principle	142
A.2.2. Performances	143
A.3. Useful constants	145
A.3.1. Silicon properties	145
A.3.2. Silicon oxide properties (SiO ₂)	146
Terms, abbreviations	147
Bibliography	153
List of figures	157
List of tables	161

Introduction

The LHC accelerator, currently under construction at CERN, will be the theatre where Physicists will watch the most powerful collisions ever seen so far, at an unprecedented rate. It will be a state-of-the-art accelerator giving physicists a chance to uncover new secrets and to shed light on processes that have not been observed yet.

Indeed, the standard model of particles and interactions, confirmed so far by many results at previous accelerators, requires the existence of a still unobserved particle, the Higgs boson, in order to be complete. Also, new mechanisms and theories beyond the standard model have been proposed by theoreticians but they still need experimental observations to be either confirmed or ruled out.

At the LHC, the Belgian universities are involved in CMS*, a general-purpose detector among the four experiments that will be installed along the accelerator ring. CMS will be, like other High Energy Physics experiments, an onion-like detector composed of different layers: from the outermost Muon-chambers to the innermost tracker and pixel detectors. Our group is involved in the construction of the tracker, which will be uniquely composed of about 25000 silicon detectors, covering a sensitive area of 206 m². The description of CMS, its tracker and the LHC environment are given in chapter 1.

To the contrary of previous accelerators with relatively low radiation levels, the very characteristics of the LHC will generate a radiation environment that will be the harshest High Energy Physics environment so far. Hence, operating silicon detectors for 10 years or more at these radiation levels is one among the many challenges raised [5]. Chapter 2 is dedicated to the description of silicon microstrip detectors, their operating principle and their evolution after a long exposure to high radiation levels.

Previously involved in testing the radiation tolerance of MSGCs, our group had also some experience with silicon detectors but we took the opportunity to enter the world of large scale segmented silicon detectors through an involvement in monitoring the radiation tolerance during the production of sensors dedicated to the CMS tracker. Indeed, the large

* CMS stands for Compact Muon Solenoid.

number of sensors requires a complex strategy for the qualification of the sensors, ensuring these have stable characteristics in order to build a reliable tracker. This qualification procedure is described at the end of chapter 2 and the tools developed in Louvain-la-Neuve to perform these tests are described in chapter 3.

Finally, the results obtained on CMS sensors from 2002 to 2004 will be presented in chapter 4, together with other tests made in parallel. The conclusions present a short summary of the entire document.