

氏 名 三井 真吾

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1591 号

学位授与の日付 平成25年3月22日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 p型シリコンストリップセンサーとピクセルセンサーの設計
及び放射線損傷評価

論文審査委員 主 査 教授 新井 康夫
教授 海野 義信
講師 池上 陽一
講師 杉本 康博
講師 坪山 透
チームリーダー 竹谷 篤 理化学研究所

論文内容の要旨

スイスのジュネーブにある CERN (欧州原子核研究機構) では、2009 年より陽子-陽子衝突型加速器の LHC (Large Hadron Collider) が稼働している。LHC は、世界最高の重心系エネルギー 14 TeV で設計されており、現在 8 TeV を達成している。瞬間最高ビーム輝度は $7.73 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成しており、 $1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ まで順次上げられていく。2021 年頃までの積分ビーム輝度は 350 fb^{-1} に達する予定である。2022 年以降は、瞬間最高ビーム輝度が LHC の 5 倍に上げられた HL-LHC (High Luminosity - LHC) が計画されている。2030 年までの積分ビーム輝度の目標値は 3000 fb^{-1} となる。

LHC の汎用検出器の一つとして ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) があり、ヒッグス粒子や超対称性粒子の探索などを目的としている。ATLAS は内側から、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオン検出器となっている。さらに内部飛跡検出器は内側から、ピクセル検出器 (PIXEL)、シリコンマイクロストリップセンサー (Semiconductor Tracker、SCT)、遷移放射ストローチューブ型飛跡検出器 (Transition Radiation Tracker、TRT) で構成されている。内部飛跡検出器は、超電導ソレノイドコイルによる 2 T の磁場中に置かれ、曲率半径から、粒子の運動量や崩壊点の再構成を行っている。

HL-LHC では、粒子密度が高くなり TRT が稼働しなくなるため、TRT をシリコン検出器に、また検出器が甚大な放射線損傷を受けるため、シリコンピクセル・ストリップ検出器を一桁上の放射線耐性を持つものに交換する必要がある。最内層のピクセルセンサーは、最大で約 $2 \times 10^{16} \text{ 1-MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 、マイクロストリップセンサーは、約 $1 \times 10^{15} \text{ 1-MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ の放射線照射が見込まれる。本研究では、HL-LHC のような高頻度高粒子密度でも運用可能な、高放射線環境に耐え得る n-in-p シリコンストリップセンサーとピクセルセンサーを設計開発し、放射線損傷の評価を行った。

n-in-p シリコンセンサーには様々な利点がある。まず、放射線の損傷による型反転が起らず、常に読み出し側から空乏化するため、放射線の損傷により全空乏化電圧が上昇しても部分空乏化で運転することができる。また、荷電キャリアが電子であるため、移動度が高速で電荷捕獲が起きにくい。このため放射線損傷に対し強いセンサーが期待できる。さらに片面プロセスであるため、相対的に低価格で裏面が傷に強い。しかし、n 型シリコンセンサーについて知られていることは多いが、p 型については未だ知られていないことが多い。そこで、p 型シリコンセンサーの陽子線照射試験を行い、放射線損傷の評価を行った。また、TCAD を用いて n-in-p シリコンセンサーをシミュレーションし、放射線損傷の評価した。

n-in-p シリコンセンサーは、FZ 法の 6 インチウエハーを用いて浜松ホトニクス社で製造した。ストリップセンサー用のウエハーは、 $9.75 \times 9.75 \text{ cm}^2$ の大面積メインセンサーと、周辺に $1 \times 1 \text{ cm}^2$ のミニチュアセンサーや $4 \times 4 \text{ mm}^2$ のモニターダイオードを置いている。メインセンサーは、高粒子密度環境用に設計した 2.39 cm のショートストリップを持ち、4 つのセグメントに分かれた R&D センサーである。上部の 2 つのセグメントは、センサーエッジと平行な “axial” スト

リップで、下部の2つは、センサーエッジから 40 mrad の角度を持たせた “stereo” angle ストリップである。ミニチュアセンサー・ダイオードは様々な構造を持ち、基礎特性の評価に用いた。

ピクセルセンサーは、ATLAS PIXEL センサーの FE-I3 用のバッチ #1 と大型の FE-I4 用のバッチ #2 がある。バッチ #1 の 320 μm 厚のウエハーで、n-in-p と p-in-n センサーを作り、いくつかの n 型ウエハーは 200 μm に薄型化した。また、ウエハーの周辺部にはミニチュアセンサー・ダイオードを置いた。FE-I3 シングルチップ用ピクセルセンサーは、バンプボンディングされた後テストビームに用いた。それらのミニチュアセンサー・ダイオードに 1×10^{16} 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ まで陽子線を照射し、放射線損傷によるセンサーの基礎特性の変化を調べた。

ウエハーは、FZ1 と FZ3 があり、FZ3 は FZ1 より裏面 p+ が深くなっており、空乏層が薄くなる。試験サンプルは、4 x 4 mm² ダイオード (Slim edge, Multi guard) と 10 x 10 mm² ミニチュアセンサー (新型 Punch Through Protection (PTP)、p-stop 電位評価用) で、厚さが 150、200、350 μm となる。ミニチュアセンサーには電極間分離構造が施されており、ストリップ間に p+ をインプラントした p-stop と、表面に p+ をスプレーした p-spray がある。センサーのエッジには、電場の上昇を抑える目的で p+ (p-edge) または n+ (n-edge) をインプラントした。

放射線損傷を評価するため、陽子線照射試験を東北大学の CYRIC において、2010 年 7 月と 2011 年 2 月に行った。使用した陽子線のエネルギーは 70 MeV で、最大 1×10^{16} 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ まで照射を行った。まず、センサーサンプルの静電容量を測定し、全空乏化電圧を評価した。 1×10^{15} 1-MeV $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ におけるアニーリング後の全空乏化電圧が約 600 V となり n 型の oxygen rich FZ と同様となった。そのため、6 インチの FZ 基板は、oxygenated と同等の oxygen が入っている可能性がある。

暗電流の放射線量依存性から、損傷係数を評価した。アニーリング前において、 $4.6 (\pm 0.1) \times 10^{-17}$ A/m となり、n 型の値と大きく異ならない。暗電流の温度依存性よりエネルギーギャップ E_g を評価すると、 $E_g=1.21$ eV となり n 型の値と一致した。これらの結果から、バルク部の放射線による損傷は、p 型と n 型は同様であると言える。

シリコンセンサーの不感領域を減らすために、1000 V に耐え得るエッジ幅を調べた。バイアスリングからダイシングエッジまでのインプラントを除いた距離を field width と定義し、耐電圧との関係を調査した。試験サンプルは、バイアスリングからダイシングエッジまでの距離が 80 ~ 964 μm のものを用いた。その結果、p 型、n 型サンプルともに 1000 V 以上の耐圧を得るには ~450 μm 以上の field width が必要である事がわかった。

guard ring とは、バイアスリングの周りに p+ のリング構造を入れることにより電場を抑制し、暗電流の急激な上昇を防ぐ機構である。1000 V の耐圧を得るために必要な guard ring の数や幅を調べた。測定の結果、1 guard ring は非照射時においても十分な耐圧を示し、照射後は最良となった。また Field width を最大に稼ぐためにも 1 guard ring 構造が望ましいと言う結論を得た。

次に、ホットエレクトロン写真を用いてマイクロ放電が起きている位置を特定した。赤

外線に感度のある、背面入射型冷却 CCD カメラを用いて撮影を行い、その結果 guard ring の数や幅、放射線量に関わらず、全てバイアスリング (n インプラント) でマイクロ放電が起きている事がわかった。これは表面電荷によるものと考えられ、TCAD シミュレータの結果と比較する事により評価した。

Punch Through Protection (PTP) は、ビームロスなどにより受けた大電流をバイアスリングに逃がすことにより、耐電圧が 120 ~ 150 V の AC 結合キャパシタを保護する機構である。バイアスリングと同電位の Al を延長した 5 種類の構造について評価を行った。延長 Al の最も長いフルゲート型は、抵抗値がバイアス抵抗の半分となるテスト電圧 V_{pt} が 100 V 未満、達成抵抗値が 20 k Ω 以下となり最も良い結果を示した。照射後は、 V_{pt} 、達成抵抗値ともに上昇したが、この変化は、TCAD により評価した。

電極間分離の評価のために、ストリップ間抵抗の放射線量依存性を測定した。照射量が増加するとストリップ間抵抗は減少した。これは、ストリップ間の暗電流の増加により、実際のストリップ間抵抗が減少するためである。

p-stop 構造での電場強度を評価するために、p-stop 電位の放射線量依存性を測定した。照射線量が増えると p-stop 幅依存性が小さくなり、電位は表面電位に近づいた。これは、放射線損傷による表面電荷の影響であると考えられる。また、この時の電場強度は TCAD による見積もりを行った。

さらに B 線を用いた収集電荷量の測定も行った。低放射線量では、320 μm 厚センサーは 150 μm 厚のセンサーよりも多くの電荷を収集するが、 $3.5 \times 10^{15} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ 以上の高放射線量では同程度となった。これらの現象を理解するために TCAD シミュレーションを行った。

放射線損傷として、アクセプタとして振る舞う準位の増加はバルク抵抗の低下として組み込み、暗電流の増加は SRH モデルから評価し、表面電荷の増加は + の fixed oxide charge の増加として評価した。放射線損傷によるストリップ間抵抗の低下は暗電流の増加で再現でき、p-stop 電位が表面電位に近づくのは + の表面電荷の増加によると理解出来る。また、バルク抵抗の低下、暗電流の増加、+ の表面電荷の増加から、放射線損傷による V_{pt} の変化が理解できた。n インプラントでのブレークダウンは、バイアス電圧が表面電荷に引き寄せられた電子層を排除する効果で理解できる。

以上の結果から、本研究において HL-LHC で予想される $1 \times 10^{15} \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ の放射線量レベルでも使用可能な、n-in-p シリコンストリップ・ピクセルセンサーの基本構造に関し見通しを得る事ができ、今後の開発に於ける設計指針を示す事が出来た。

博士論文の審査結果の要旨

本研究は、現在最も注目されている実験のひとつであるLHC加速器ATLAS実験において、衝突点近傍で使用されるシリコン飛跡検出器のアップグレードに関する研究である。シリコン飛跡検出器はヒッグス粒子の測定や超対称性粒子の探索等において重要な役割を果たす検出器であるが、2022年頃に予定されているLHC加速器のルミノシティ増強後においては、ATLASの内部飛跡検出器は、すべて現在のものよりも高い放射線耐性をもつシリコン・ピクセル及びストリップ・センサーに置き換えなければ測定を続ける事が出来ない。

本論文は、このシリコン・センサーをより強い放射線耐性を持つとされるn-in-p型のセンサーで実現する為に、種々の試験センサー構造を製作し基本特性の測定を行うと共に、シミュレーションソフトウェアにより現象の理解に努めたものである。具体的には電極間分離構造(p-stop, p-spray)、Punch Trough Protection(PTP)構造、Slim Edge構造、Multi Guard Ring構造等、異なる様々な試験センサーを用い、東北大学サイクロトロンでの陽子線照射実験を行い様々なデータを取得している。

この結果、 $1 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ までの照射線量に対し、バルク損傷や全空乏化電圧が現在使用しているn型シリコン検出器と同等である事や、不感領域を減らしながら1000V以上の耐圧を確保する為のSlim Edge/Guard Ring構造に関する知見を得ている。また、突発的なビームスプラッシュ等による故障を避けるためのPTP構造の最適化や、ストリップ間抵抗、p-stop電位の測定による放射線ダメージのメカニズムの解明も行っている。

さらに上記測定結果は、TCAD(Technology CAD)によるシミュレーション結果との比較が行われ、現象の考察・解明を行う事によりLHCアップグレード後の高ルミノシティ・ランに於いても使用可能なシリコン・センサーの可能性を示した。

博士論文においては、シリコン・センサーの動作原理から、要求される仕様・性能、実験方法と解析方法に関し丁寧にまた簡潔にまとめられている。本論文は日本語で書かれているが、研究の中心となった内容は英文論文として学術雑誌において発表されている。

以上の事から、三井氏の論文は最先端の学問的知見を含むものと判断出来、博士の学位論文としてふさわしいものであると認め合格とした。