

機関番号：12102

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20540291

研究課題名 (和文) P型シリコンを用いた高耐放射線性マイクロストリップ検出器の開発

研究課題名 (英文) Development of radiation-hard p-bulk microstrip detector

研究代表者

原 和彦 (HARA KAZUHIKO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師

研究者番号：20218613

研究成果の概要 (和文)： 欧州 CERN 研究所の LHC 加速器実験の次期増強計画時に使用できる放射線耐性に優れたシリコンマイクロストリップ検出器を開発した。P 型シリコンをバルクに用いることで、 10^{15} n/cm²の照射線量でも全空乏化電圧は 800V 程度に収まり、精密飛跡検出に十分な収集電荷量が得られる。濃度を最適化した P-STOP や P-SPRAY により、1000V までブレークダウンなしにバイアスがかけられる。電極信号分離、電極間容量、電極間抵抗も問題ない。パンチスルーによる大電流に対するセンサー保護機能の設計も施した。

研究成果の概要 (英文)： We have developed a radiation hard silicon microstrip sensor to be operational at the LHC upgrade planned at CERN in Europe. The sensor utilizing p-type bulk material can tolerate up to the expected fluence of 10^{15} n/cm², showing a full depletion voltage below 800 V and yielding a collected charge sufficient for precision particle tracking. The sensor can also be biased to 1000 V without showing micro-discharge after optimizing the P-STOP and P-SPRAY concentrations. The performance concerning strip isolation, interstrip capacitance, and interstrip resistance is found acceptable. We have also designed a detector protection mechanism based on punch through against large signal current. These results led the ATLAS Collaboration to agree that our sensor is the baseline design.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2010 年度	300,000	90,000	390,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：数理系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：P 型シリコン検出器, superLHC, 放射線耐性, 電極分離, マイクロストリップ

1. 研究開始当初の背景

シリコンマイクロストリップ検出器は、コンパクトかつ優れた位置分解能のために、高エネルギー実験での飛跡検出器として重要な役割を果たしている。欧州 CERN 研究所での LHC 衝突器での ATLAS 実験では、現在、n バルクを用いた p 電極読み出しのシリ

コンセンサー (p-in-n) を用いているが、これは衝突輝度を 10 倍にする LHC 増強 (super LHC) 後では、放射線損傷のために使えなくなる。放射線による p 型へのバルク部型変換を経て全空乏化電圧が上昇するため、p 電極から位置情報を読み出すためには全空乏化が必須となる。全空乏化電圧がシステムの耐

圧 500V を超えると使えなくなる。

そこで新たに p バルク n 電極読み出し (n-in-p) センサーを開発することで、LHC 増強での 10^{15} n/cm^2 の放射線線量でも使用可能なマイクロストリップセンサーの実現を目指す。n-in-p センサーでは、pn 接合面が常にストリップ側にあるため、信号読み出しに全空乏化は必須でない。そのためシステム耐圧を超えたら、部分空乏化状態で使用できる特長がある。移動度の高い電子を読みだすため、放射線損傷を受けても収集電荷量への影響が少ないことも期待できる。しかしながら、高純度の p 型を用いたセンサーは過去の高エネルギー実験に使用された例はなく、ウェハの選定から始め、p 型に特有な電極分離法の設計、高輝度実験環境下でのセンサー保護の設計など多くの研究開発項目がある。

2. 研究の目的

Super LHC 実験に使用できる放射線耐性に優れたシリコンマイクロストリップ検出器を開発する。そのために p 型シリコンを用いた検出器に着目して、 10^{15} n/cm^2 の照射線量でも全空乏化電圧の変化が穏やかな p 型バルクを選定し、P-STOP 等による電極分離構造の設計、パンチスルー (PT) によるセンサー保護機能の設計を行い、それらの放射線耐性を評価する。

3. 研究の方法

センサーの試作は浜松ホトニクスで行った。1 cm 角のサンプルセンサーに 8 mm 長のストリップ電極を $74.5 \mu\text{m}$ ピッチで 100 本埋め込む。ウェハは 4" および 6" の FZ (float zone) 法, MCZ (magnetic Czochralski) 法によるもので、工業的に入手できるものを使用した。6" FZ に関しては欠陥の特に少ないもの (FZ1) と通常品 (FZ2) を比較検討した。電極分離の方法として、P-STOP の濃度を変えて配置するものと、全面に P-SPRAY を施すもの、両方を施したものを試作した。

試作品は、東北大学 CYRIC での 70MeV 陽子線照射、スロベニアのリュブリャナ原子炉での中性子照射、原研高崎でのコバルト γ 照射を通じて検出器性能の放射線耐性を評価した。照射実験は、陽子線照射は 6 回、中性子照射は 2 回、 γ 線照射は 5 回行った。

センサーの特性は、 β 線を用いた収集電荷測定や LCR メータを用いた全空乏化電圧と電極間容量測定、電気試験による電極間分離、電極間抵抗値、バイアス抵抗値、パンチスルー電圧に対して評価した。特にコバルト照射では、実際に近い線量率での照射を与えながら、電極間分離や IV 特性評価を行った。これらの結果は、適宜国際学会で報告を行った。

4. 研究成果

(1) 全空乏化電圧の放射線量依存性

図 1 に $320 \mu\text{m}$ 厚のセンサーの全空乏化電圧を陽子照射の結果を示す。4" では大きな依存性を示したが、6" は FZ, MCZ ともに依存性は緩やかで 10^{15} n/cm^2 照射量でも 500V 程度に抑えられることが分かった。

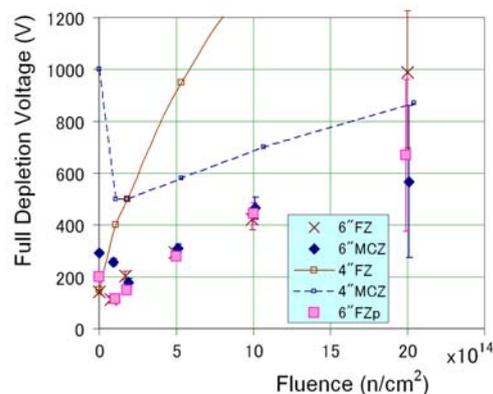


図 1 異なるウェハに対する全空乏化電圧の照射量依存性

(2) 収集電荷量

上の有望な結果を得て、R&D を ATLAS 全体にひろげて共同で行った。図 2 は β 線源を用いて $1.3 \times 10^{15} \text{ n/cm}^2$ 照射サンプルに対して測定した収集電荷量である。電圧依存性とともにより一致が得られ、また、目標とする $\text{S/N} > 10$ を 500V 以下の電圧で達成できることが確立した。

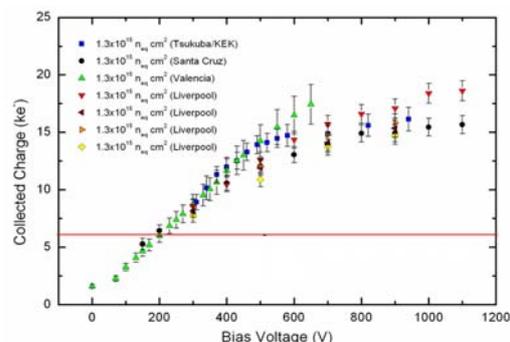


図 2 通過した荷電粒子に対する収集電荷量。いくつかの大学での測定結果は一致。横線は $\text{S/N} = 10$ に相当する電荷量 (アニール後)。

(3) 収集電荷量の放射線量依存性

図 3 はバイアス 500V での放射線量依存性を中性子、陽子照射を比較して示す。バルク部損傷は放射線の種類によらず NIEL でスケールされることが分かった。他社のセンサーも同様の振舞いを示した。

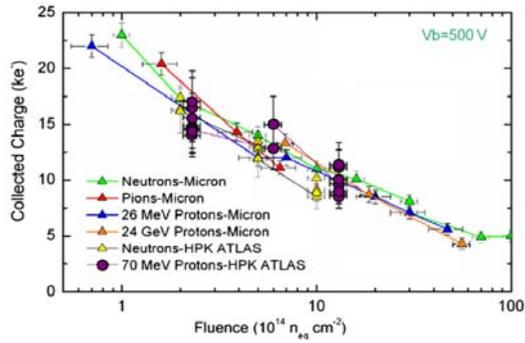
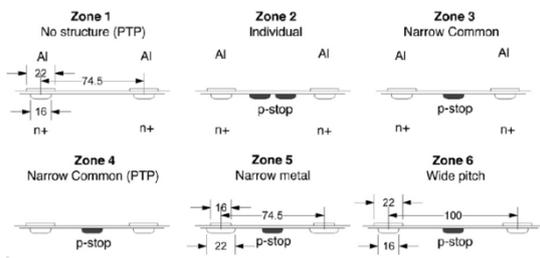


図3 バイアス 500V での通過した荷電粒子に対する収集電荷量。中性子，陽子照射，他のメーカーの結果を比較(アニール前)。

(4) 電極分離構造



p 型センサーでは電子反転層が形成されやすいので、電極間信号分離を劣化させないための P-STOP を打ち込んだ (上図)。全くない Z1 を含め、6 種の形状とさらに全面に P-spray を施すことの組み合わせから、最適なものを決定した。

これらは濃度が高いとブレークダウンしやすく、P-spray では $2 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ が最適である。

バイアス電圧を上げることで電子層は排除でき電極分離は向上する。図4に、陽子照射したサンプルに対して電極分離が達成さ

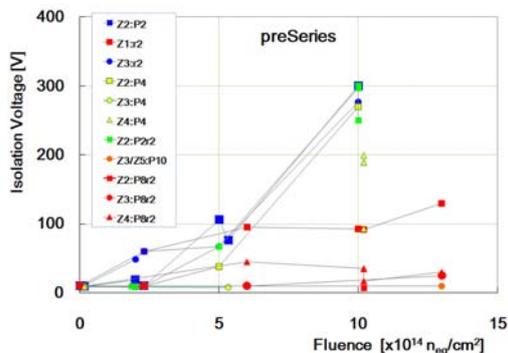


図4 信号分離に必要なバイアス電圧の照射量依存性。いくつかの構造と P-STOP/P-spray 濃度の組合せを示す。P(r)は P-STOP(P-spray)の濃度を $10^{12}/\text{cm}^2$ の単位で示す。

れるバイアス電圧を示す。いずれも 500V 以下であるが、放射線量とともに劣化し、P-STOP 濃度依存性も見られる。ブレークダウン電圧への影響を考慮して、P-STOP 濃度は $4 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ を中心に設計を進める。

(5) 電極間容量

図4は電極間抵抗の測定で判断したが、速い信号には、電極間容量も重要な要素である。図5には、1MHz で測定した電極間容量 (中心と両側2本間の容量) を照射量依存性とともに示した。バイアス電圧を加えれば 300V で仕様である $1.2\text{pF}/\text{cm}$ を満たすが、 $10^{12}/\text{cm}^2$ のごく低照射量においてやや劣化する。この低照射量での振舞いは、コバルト照射で詳細な追試を行う。

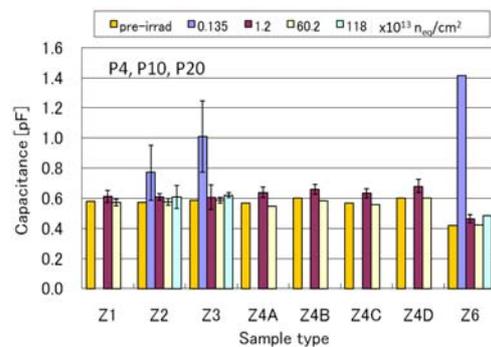


図5 電極間容量の照射量，分離構造依存性。バイアス電圧 300V。

(6) パンチスルー保護機能

加速器事故により大量の粒子が一度にセンサーに入射されると、ストリップ電極の抵抗のために電圧降下が起こる。酸化膜を挟んだアルミ電極はグラウンドに保たれるため、大きな電圧降下は酸化膜を破壊する危険性があり、特に高輝度実験では配慮が必要になる。ここでは電圧降下が起こると、PT 機能を用いてバイアス電極に電流を回避させることで保護する (PT 保護)。

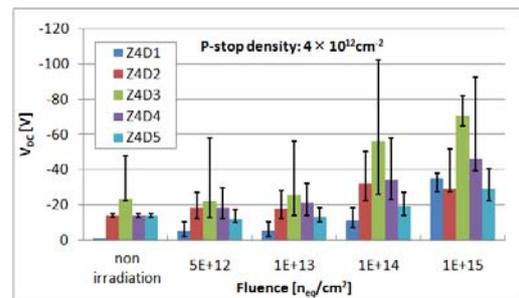


図6 PT保護構造の違いによる PT 電圧の照射量依存性。ヒストグラムは PT 部の抵抗がバイアス抵抗と同程度になる電圧，誤差棒は 10% と 90%になる電圧。

P-STOP が PT ブロッカーとして機能するので、有効に機能させるための設計が必要になる。読み出し電極に直流電圧をかけ、バイアス電極との抵抗を測定し PT を判断した結果を図 6 に示す。図 6 には陽子照射の前後で PT 電圧がどう変化するかを 5 種類の設計に対し測定した。これらの設計では、電極間ギャップはどれも等しいが、PT を起こす領域のポテンシャルをゲート効果で抑えるほど、低い電圧で PT 保護が機能し、特に 10%-90% で規定した誤差棒が狭い特長があることが分かった。浜松ホトニクス製の酸化膜の直流の耐圧仕様は 100V であるので、PT を起こした後の電圧は十分低い。

(7) 赤外線レーザーによる PT 測定

(6) の測定では直流電圧を用いるため、PT が起きた後の抵抗値が測定される。実際に赤外線レーザーを照射し大電流を発生することで、どのように PT 保護がされるか、時間特性を含めて評価した。PT 保護されると電圧は低く抑えられるが、図 7 には PT 保護前に最大どの程度の電圧が発生するかを、レーザーの入射位置、電圧の測定位置を PT 保護される側に近い場合と遠い場合で評価した。遠くで発生した電流をストリップ電極でバイアス電極に逃がすために電圧降下が起きる。試験したのは荷電粒子が 10^6 個入射された状況までであるが、数 μs にわたりこの電圧がかかるので、酸化膜耐圧の時間特性を含めた仕様を考慮する必要がある。

陽子照射したサンプルでも同様の試験を行ったが、照射により PT 特性が劣化することはない。

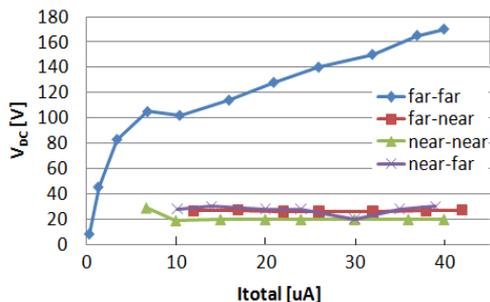


図 7 PT 保護直前に電極に発生する最大電圧。横軸はセンサー電流で $40\mu\text{A}$ は 10^6 個の荷電粒子通過に相当。通過した場所と読み出しが PT 保護から遠い場合の電圧が最も高い。

(8) コバルト γ による試験

陽子・中性子照射による放射線耐性試験の結果、開発した P 型センサーは sLHC での照射を受けても大きく性能を劣化しないことが分かったが、(5) の試験により低照射量での振舞いを詳細に理解する必要がある。問題とする $10^{12}/\text{cm}^2$ レベルの照射量では、バルク

部の損傷はわずかで、酸化膜に蓄積する電荷による振舞いと理解でき、コバルト γ を照射することで状況を再現できる。

sLHC での電離性放射線量は最大約 50 Gy/h であるので、試験ではこの線量率に近い設定で、照射をしながら電流-電圧特性を評価した。図 8 は 100 Gy/h で照射中にブレイクダウン電圧を測定し、時間とともに変化する様子を示す。サンプルは 2 種類の FZ ウェハを用いたもので、初期ブレイクダウ電圧がそれぞれ 1000V と 600V と異なるが、直ちに 500V 程度劣化し、その後徐々に回復する。このセンサーの全空乏化電圧は 200V なので、FZ2 は使用できないと結論できる。

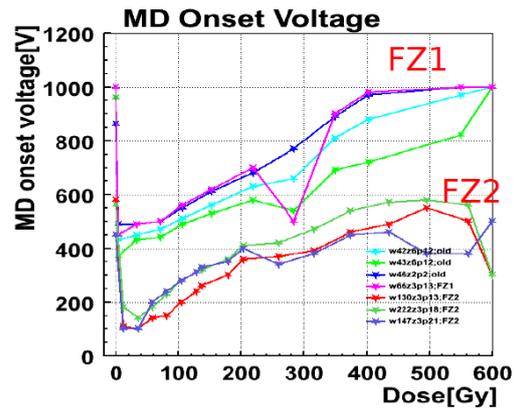


図 8 γ 線照射中(100 Gy/h)でのブレイクダウン電圧の変化。サンプルは 2 種類の FZ。

γ 線を照射中の電極分離の測定も行った。P-STOP 濃度に依存し線量が異なるが、どのサンプルも電極分離の電圧は徐々に上昇し、 γ 線により発生する信号とバランスを取りながら電極分離が達成される様子が観測された。どのサンプルも照射中に加えていたバイアス電圧で電極分離が達成されている。

LCR メータによる電極間容量の評価は照射中にはできないので、照射後に行った。陽子照射と同様に、 γ 線の低照射量でも容量は劣化する。限られたサンプル数での評価であるが、低照射量では収集電荷量に劣化がないので、S/N 比は許容範囲に保つことができる。

まとめ

P 型バルクを高耐放射線性シリコンセンサーに使用する研究は我々により着手され、有望な結果を受けて ATLAS 実験グループ全体としての R&D グループが形成された。詳細な放射線耐性の試験を経て、我々の設計に基づくセンサーが sLHC 用センサーの基本路線とすることを決定した。但し、低線量での特性が一旦劣化することも新たに分り、ウェハの選定、センサー表面処理の方法の最適化を含む検討を継続することが必要である。また、パルスレーザーを用いた時間特性を含むセ

ンサー保護機能の評価の結果、酸化膜の耐圧仕様に時間情報が必要であり、その評価を含めた研究がこれからの継続研究課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① K. Hara 他 (73 名), *Testing of bulk damage of n-in-p silicon sensors for very high radiation environments*, NIM A636 (2011) S83-S89 査読有
- ② S. Lindgren, 29 名略, K. Hara, 41 名略, *Testing of surface properties pre-rad and post-rad of n-in-p silicon sensors for very high radiation environment*, NIM A636 (2011) S111-S117 査読有
- ③ S. Gonzalez-Sevilla, 9 名略, K. Hara, 11 名略, *A silicon strip module for the ATLAS inner detector upgrade in the super LHC collider*, NIM A636 (2011) S97-S103 査読有
- ④ J. Bohm, 28 名略, K. Hara, 42 名略, *Evaluation of the bulk and strip characteristics of large area n-in-p silicon sensors intended for a very high radiation environment*, NIM A636 (2011) S104-S110 査読有
- ⑤ K. Hara 他 (73 名), *Development of Radiation Hard N+-on-P Silicon Microstrip Sensors for Super LHC*. IEEE TNS 56/2, 468-473 (2009) 査読有
- ⑥ G. Casse, 28 名略, K. Hara, 42 名略, *Comparison of charge collection efficiency of segmented silicon detectors made with FZ and MCz p-type silicon substrates*, NIM A591, 178-180 (2008) 査読有

[学会発表] (計 11 件)

- ① K. Hara, *Punch Through Protection for Microstrip Sensors*, ATLAS Tracker Upgrade Workshop, Mar. 31, 2011, CERN, スイス.
- ② K. Hara, *Hamamatsu n-on-p sensors for ATLAS upgrade tracker*, CMS Tracker Upgrade Workshop, Sep. 21, 2010, CERN, スイス.
- ③ 原和彦, 「sLHC 用 P バルクシリコンセンサーの放射線損傷実験」 第 30 回サイクロトロンラジオアイソトープセンター研究報告会, 2009 年 11 月 24 日, CYRIC 東北大学.
- ④ K. Hara, *Testing of bulk damage of*

n-in-p silicon sensors for very high radiation environments, International Symposium on Semiconductor Tracking Devices, Aug. 28 - Sep. 2, 2009, 広島国際会議場、広島市.

- ⑤ K. Hara, *Development of Radiation Hard N+-on-P Silicon Microstrip Sensors for Super LHC*. IEEE Nucl. Sci. Symp, Oct. 21 -25, 2008, Dresden, ドイツ.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原 和彦 (HARA KAZUHIKO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師
研究者番号: 20218613