

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420296

研究課題名(和文)放射線環境における帯電・線量計測用超高感度半導体サブナノセンサの開発

研究課題名(英文)Development of high sensitivity semiconductor sub-Nano sensor for charging and dose under radioactive environment

研究代表者

三宅 弘晃(Hiroaki, MIAYKE)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：60421864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：高時間分解能化を果たす為に、電圧印加時における空乏層の形成等の挙動について、現在世界最高分解能である、位置分解能2 $\mu\text{m}$ を有するPEA法を用いた超高分解能空間電荷測定装置により計測する事により、p型、n型、pn接合型半導体基板等の空乏層の形成状況の検証試験の結果、世界で始めて空乏層の形成を確認することに成功し、前述素子に対して印加電圧の極性と大きさを変更する事により、空乏層の形成状況が変化する事が確認できた。これらは、半導体基板-電極間の仕事関数の違いにより、ショットキー接合やオーミック接合などの条件によるものである事も確認でき、半導体帯電計測センサへの現時点での適切な構造を検証する事が出来た。

研究成果の概要(英文)：For developing of high time resolution of space charge measurement using semiconductor, we measure the depletion layer in the bulk of semiconductor under DC application using super high resolution space charge measurement system using PEA (pulsed electroacoustic) method which has 2  $\mu\text{m}$  positional resolution as the best PEA system in the world. We prepare p-type, n-type and pn type semiconductor as a sample. As the results, we obtained and confirmed the formation of depletion layer in the each bulk of samples. The formation of depletion layer was different at each samples with the each voltage application. It is considered that the work function differential was exist between semiconductor and electrode materials. Due to the differential of work function, the junction formation is decided either Ohmic or schottky junction. From the results, we obtained the fabrication index for the sensor of PEA system.

研究分野：計測工学

キーワード：帯電計測 宇宙環境 半導体 センサ開発

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の宇宙開発は、総合科学技術会議(以下、科技会議)の宇宙開発利用の基本戦略や宇宙基本法により、人工衛星や国際宇宙ステーション(ISS)を利用した地球観測や安全保障のための情報収集等の利用を中心とした体制へと大きく移行した。さらにエネルギー基本計画(閣議決定、H19)や環境エネルギー技術革新計画(科技会議、H20)により、政府はグリーンイノベーションや震災による原発停止の電力不足への対応として、宇宙太陽光発電の技術開発を進めている。

また近年、衛星は小型化・高機能化が進んでおり、小型衛星を複数機、同軌道もしくは近距離で協調して運用する事で大型機と同等、或いはより高性能な機能の実現を図ろうという衛星コンステレーションシステムの開発・運用も盛んに行われてきており、軌道上で運用される衛星数は今後飛躍的に増加していく傾向にある。世界に目を向けると、発展途上国では、GPS や陸地観測など、安全保障の為に自国で衛星システムを導入する動きも活発になっている。また、EU では GPS 衛星や商用通信等の大型衛星を 2015 年までに年間 10 機以上打ち上げる予定であり、人工衛星は世界的に安定運用が不可欠の社会インフラシステムとなっている。

しかしながら、人工衛星は非常に厳しい放射線環境であるヴァン・アレン帯(電子や陽子等の荷電粒子、プラズマで満たされた空間)で運用される為、荷電粒子に起因した帯電・放電、材料の絶縁破壊現象により、誤作動や永久故障するという事故が多発している。米 Aerospace 社の Dr. Koons らは、米空軍と NOAA(アメリカ海洋大気局)と共同で調査し、宇宙機障害の 8 割以上が荷電粒子によるものと報告している。わが国でも、環境観測技術衛星みどり 2 号(ADEOS-II)が 2003 年 10 月に帯電・放電によって太陽電池パドルハーネス(電力送電線)を損傷して、設計寿命の 1/3 以下で運用停止状態になり数百億の損失となった。

このような状況で、現在衛星の高信頼化を果たすためには、

- (1) 衛星軌道上での帯電の実測
- (2) 放射線環境における宇宙機材料の帯電物性の解析

が求められている。(1)については、現状の帯電センサの熱や放射線等の耐環境性や分解能の不足により、軌道上で使用できる帯電計測装置の開発には未だいたっていない。しかし、米国の帯電研究の第一人者である Dennison 教授(ユタ、州立大)や電気絶縁材料の物性研究(帯電計測、PL、EL 測定)の権威である Dr. Laurent(仏国 CNRS/LAPLACE 所長)、さらには宇宙環境の第一人者である NASA/JPL(ジェット推進研究所)Dr. Katz、Dr. Kim、JAXA 越石主任研究員らは衛星材料の帯電物性の解析および軌道上で実測が必須で、地上試験と比較し総合的に帯電現象を理

解する事が必要と主張している。

(2)については、表面帯電計測については、前述の Dennison 教授と NASA/JPL の Green 氏らにより二次電子・光電子放出や抵抗率測定を通して実施されているが、衛星設計のためのデータ取得が中心で物性の議論には至っていない。また内部帯電計測は、申請者らのグループと Dr. Laurent と Dr. Griseri(同所属)が電子線材料の帯電計測研究を申請者らのグループ開発したパルス音波による帯電計測技術を用いて行っているが、電子線以外の様々な線種に対する研究は実施していない。また、衛星の放射線耐性は積算吸収線量で評価されることが主であるが、帯電と吸収線量を結ぶ物理モデルも現状存在していない。衛星開発者たちは、従来の線量評価手法を帯電評価へ利用できるようになる事を望んでいるのが現状である。

### 2. 研究の目的

前章で述べた研究背景より、本研究課題を放射線環境での帯電物性解析を目的とした、『放射線環境における帯電・線量計測用超高感度半導体サブナノセンサの開発』とした。

これまでの若手研究等の先行研究にて、半導体の pn 接合等に生じる空乏層を、圧電素子の分極構造と等価であると予測し、半導体を用いた圧力波検出センサを作成し、パルス状の圧力波検出には成功している。そこで、本研究では、高感度で耐宇宙環境性を有する半導体圧力波センサの開発を目的としているため、圧力波の時間幅検出感度を ns から ps へ高帯域・高感度化を実施していく必要がある。高時間分解能化を果たすために、電圧印加時における空乏層の形成等の挙動について、現在世界最高分解能である、位置分解能 2 $\mu$ m を有する PEA 法を用いた超高分解能空間電荷測定装置により計測することにより、高分解能化への指針を得る。

### 3. 研究の方法

#### (1) 圧力波検出用半導体センサの原理

Fig. 1 の(a)に PVDF の構造式(b)に双極子モデルを示す。Fig. 2 の(a)に半導体 pn 接合のモデル (b)にショットキー接触のモデルを示す。PVDF は圧電性を有する強誘電体であり、PEA 装置のセンサとして使用されている。構造内の双極子と呼ばれる極性の向きが揃っている時に圧電性を有する。PVDF の場合、出力信号の大きさは、厚さに依存し、厚いほど出力電圧が高くなる。装置の位置分解能は、厚さ(時間幅)に依存する。半導体 pn 接合やショットキー接触の際に生じる、空乏層内の空間電荷を双極子と見立てれば、PVDF のように空乏層を圧力波検出用センサとして用いることができると考えられる。空乏層をセンサとして用いる場合、出力信号は空乏層内の空間電荷の量(不純物濃度)、位置分解能は厚さ(時間幅)に依存する。通常空乏層幅は、nm オーダーであることから、容易に薄膜セ

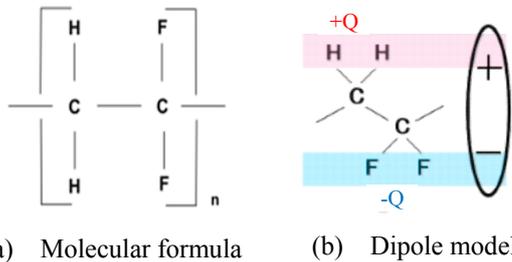


Fig. 1 Polyvinylidene fluoride

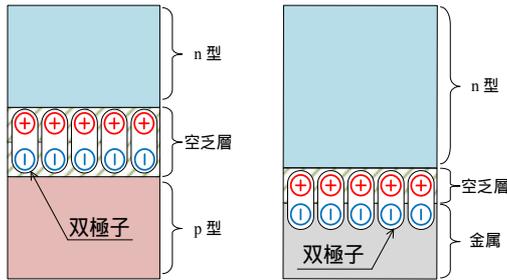


Fig. 2 schematic diagram of semiconductor sensor

ンサの作製が可能である。また、出力信号の大きさも不純物濃度を変更するだけであり、容易に行うことができる。

(2) 測定システムおよび測定試料・条件

測定には、位置分解能  $2 \mu\text{m}$  の高分解能型 PEA 装置を使用した。測定は、 $100 \text{ V}$  のパルス電圧を繰り返し周波数  $10 \text{ kHz}$  で印加し、オシロスコプの帯域を  $2.5 \text{ GHz}$ 、サンプリング周波数を  $20 \text{ GS/s}$ 、加算平均処理を  $10000$  回とした。測定試料は、公称試料厚さ  $380 \mu\text{m}$ 、結晶方位が  $\langle 100 \rangle$ 、不純物濃度が  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  程度の n 型、p 型、pn 接合型のシリコン基板を使用し、両試料に、 $V_{\text{DC}} = 0, \pm 300, 1\text{k}$  (n 型基板のみ)  $\text{V}$ 、 $v_p = 100 \text{ V}$  ( $t_p = 0.7 \text{ ns}$ 、 $f_r = 10 \text{ kHz}$ ) を印加し、出力信号を超高分解能 PEA 法により計測した。

半導体 pn 接合素子の作製は、以下の条件にて行った。

- ・ ベース基板：  
p 型シリコン基板・不純物(ボロン)濃度  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- ・ 注入イオン：  
As・濃度  $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
- ・ 加速エネルギー：  
 $50 \text{ keV}$  (ヒ素イオン飛程約  $50 \text{ nm}$ )
- ・ アニール温度：  
 $700$  (窒素雰囲気中  $10$  分間)

なお、接地電極を Al、高電圧電極に半導電層を用い、高電圧電極に印加する電圧の極性によって、正もしくは負と表現する。

4. 研究成果

Fig. 3 に p 型シリコン基板測定波形を示す。同図(a)にはモデル図、(b)に出力信号波形を示す。Fig. 4 に n 型シリコン基板測定結果を示す。同図(a)にモデル図を、(b)に出力信号波形を示す。Fig. 3(b)の p 型シリコン基板の出力信号波形に注目すると、 $300 \text{ V}$  印加時に出力信号が減衰し、 $-300 \text{ V}$  印加時に出力信号が増幅している波形が観測された。また、Fig. 4

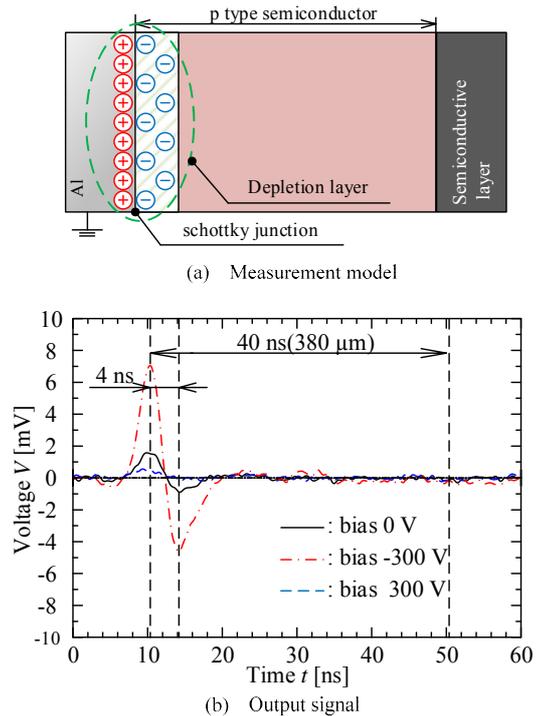


Fig. 3 Measurement signal of p type silicon substrate

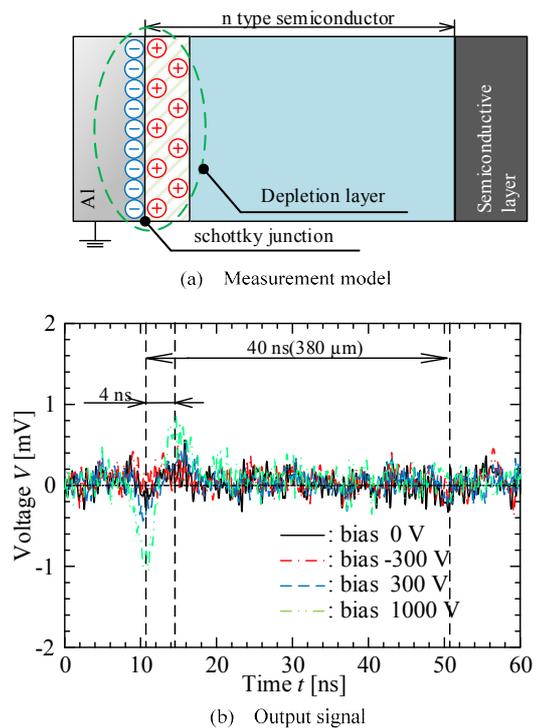
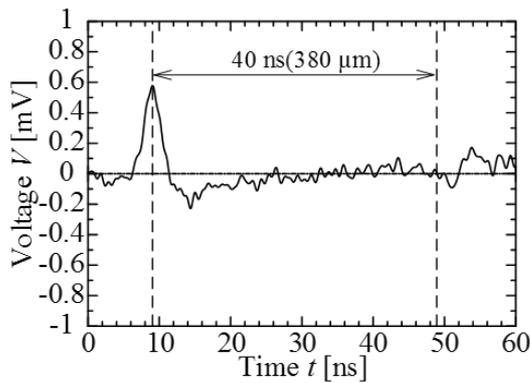
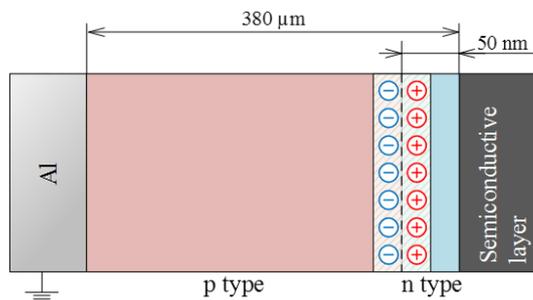
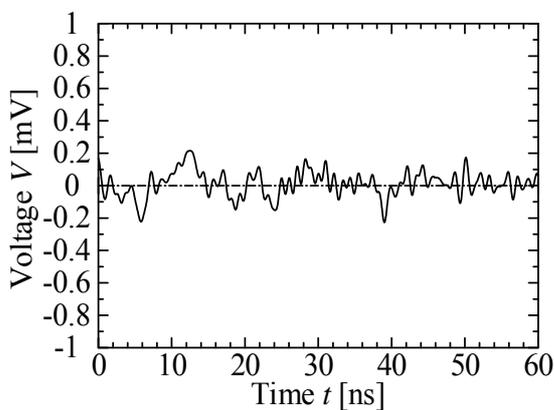


Fig. 4 Measurement signal of n type silicon substrate



(a) 不純物濃度(As) $10^{17} \text{ cm}^{-3}$



(d) 不純物濃度(As) $10^{20} \text{ cm}^{-3}$

Fig. 5 Measurement signal of pn type silicon substrate

の(b)n型シリコン基板の出力信号波形に注目すると、-300 V 印加時に出力信号が減衰し、1 kV 印加時に出力信号が増幅している波形が観測された。これらの信号が電圧の極性によって増減する結果から、順バイアス、逆バイアスの特性が観測できていると考えられるため、この信号は空乏層内の空間電荷であると言える。また、p型とn型シリコン基板の順バイアス、逆バイアスの方向が逆であることから、この信号が空乏層であることがわかる。これらのことから、半導体をアルミ板と接触させたことにより、ショットキー接合による空乏層が形成されたと考えられる。

Fig. 5 に pn 接合基板測定時の結果を示す。同図(a)は (a) $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  を、(b)に  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の出力信号波形を示す。

同図より、不純物濃度が  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  の pn 接合 Si 基板から出力信号波形が観測されたが、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の素子では信号が検出されなかった。この差の検出は、これは p 領域と n 領域のイオン濃度の偏りによるものと現状では推測しているが、今後さらに検証していく必要がある。

以上より、波形の感度的には、p 型基板が一番出力が大きいと考えられている。また、pn 基板では孤立パルスが確認されており、PEA 法のセンサーとしては従来の圧電素子と同様の出力傾向であるため、移行しやすいと思われる。

今後は、半導体基板と接触させる金属材料を検討し、仕事関数を調整することにより、ショットキー接合やオーミック接合などの空乏層形成条と印加電圧を調整することによりセンサとして最適な条件を導出する必要がある。本件については既に、検証を進めており、再現性が確認された段階で、論文投稿等で公表を行う予定である。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

(1) 園田 啓太、熊岡 賢祐、三宅 弘晃、田中 康寛、澤野 憲太郎、丸泉 琢也、越石 英樹、「圧力波検出用半導体センサ開発へ向けた基礎研究」、H28 年電気学会全国大会、平成 28 年 3 月 16 日、東北大学川内キャンパス(宮城県・仙台市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

三宅 弘晃 (Hiroki MIYAKE)

東京都市大学・工学部・准教授

研究者番号：60421864