

## 宇宙観測用アバランシェフォトダイオードの シングルイベント効果のシミュレーション研究

荻田 竜平 (横浜国立大学大学院 工学府 片寄研究室)

### Abstract

我々はリバース型アバランシェフォトダイオード (APD) の荷電粒子に対する応答であるシングルイベント効果 (SEE) の影響を明らかにするため、加速器による重イオン照射実験と TCAD を用いた数値計算シミュレーションから半導体内の電場と電荷の挙動を調べている。

数  $\mu\text{m}$  から数十  $\mu\text{m}$  程度の飛程をもつ重イオン照射から、SEE によるゲイン低下が確認でき、エネルギー損失の深さとゲインの関係が明らかになった。アバランシェ増幅領域は予想された通り約  $10\mu\text{m}$  程度まであり、これらの実験結果を検証するため内部構造とアバランシェ増幅モデルを仮定した数値シミュレーションを実施した。

### 1 Introduction

近年、装置の大型化と飛翔体による長期間観測によりギガ電子ボルトを超える高エネルギー宇宙放射線の直接精密観測が可能となった。その装置の例として挙げられるのは Astro-H、ATHENA/IXO、CALET 等であり、これらの装置にはエネルギー吸収能力の大きな結晶シンチレータなどを用いたカロリメータが使用されている。またその読み出し用光センサーとしては高いゲインをもつリバース型 APD (アバランシェフォトダイオード) の開発研究が行われ使用されている。これらは従来の光電子増倍管よりもコンパクトで、比較的低いバイアス電圧かつ低消費電力での動作が可能である点から非常に有用である。

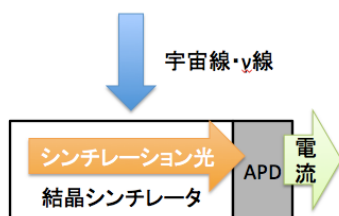


図 1: 結晶シンチレータと APD

しかし、APD に直接荷電粒子が当たることでシングルイベント効果 (SEE) と呼ばれる現象を引き起こ

すことがある。これはシンチレーション光測定においてはノイズとなりうる。更に生成された電荷はデバイス内をドリフト運動し、過渡の電流増幅や、構造の破壊による故障の原因となる。これらにより、高エネルギー放射線環境である宇宙空間での、数年にわたる長期的な宇宙線観測においては、測定結果の誤差や放射線劣化によるノイズ増加など様々な悪影響が予想される。

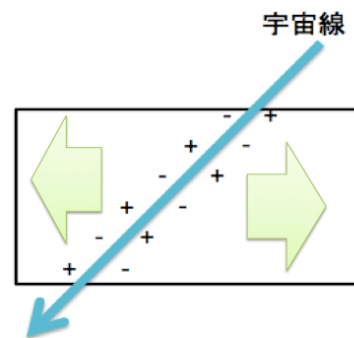


図 2: シングルイベント効果の様子

そこで、我々は荷電粒子が直接 APD に入射した際の挙動を重イオン照射実験と数値シミュレーションから明らかにする研究を行っている。ビーム照射実験や電気特性測定を忠実に再現する数値モデルによる計算ができれば、装置打ち上げ後に検証が難しい

さまざまな現象についても詳細な調査が可能となる。

## 2 Experiment

SEE による APD ゲイン等への影響を実験的に明らかにするため、高崎量子応用研究所 3MV タンデム加速器を用いた TIBIC システム (図 4) による照射実験を行った。

APD はキャップを取り外した状態で専用のチップキャリアにはんだで固定し (図 6, 図 7)、密閉された真空環境のビームラインに設置した (図 8)。そして、炭素イオンをマイクロビーム集中させ、 $20[\mu\text{m}] \times 20[\mu\text{m}]$  のスキャンで APD のチップに照射した。発生したパルス電荷は、CSA (Charge Sensitive Amp)、SA (Shaping Amp) を経由して MCA (Multi Channel Analyzer) によってエネルギースペクトルに変換された。これをガウス分布でフィッティングすることでピークのゲインを測定した。逆側の端子は  $50\Omega$  の固定抵抗で終端しており、電流値がオシロスコープで観察されている。シグナルがある度にオシロスコープから TTL 信号のトリガアウトが発信され、ビーム停止を行うことで、1 イベント毎の電流値を MCA で測定する。

例として、炭素イオンエネルギーが 6MeV、バイアス電圧が 10V の時のエネルギースペクトルとガウシアンフィッティングを図 3 に示す。

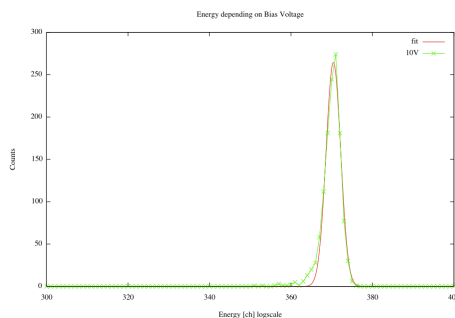


図 3: MCA で測定されるエネルギースペクトル例 (6MeV の C をバイアス電圧 10V で照射)

この様にしてイオンエネルギー 6[MeV] と 15[MeV] の炭素イオンを照射した時のそれぞれのバイアス電圧 10-430V でのゲインの変化を測定した。

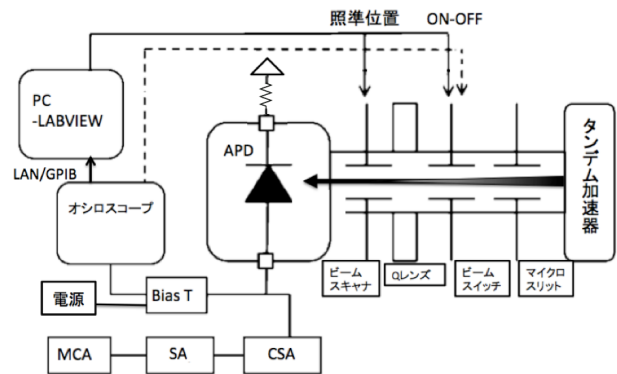


図 4: 重イオンマイクロビーム照射用 TIBIC システムのセットアップ

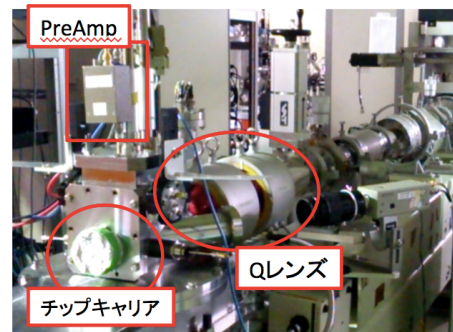


図 5: ビームラインと TIBIC システム

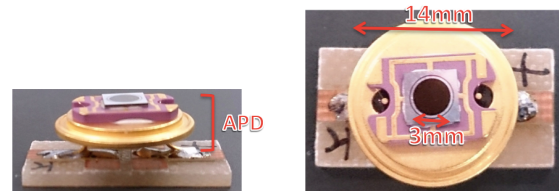


図 6: チップキャリア上に図 7: チップキャリア上に固定された APD (横) 固定された (真上)

## 3 Simulation

また、測定結果を検証するため数値計算を同時に行っている。計算には半導体デバイス・回路シミュレーターの Synopsys 社製 TCAD を用いて、I-V・C-V 特性、重イオン照射によるゲイン低下を TCAD で再現し、測定結果と比較することによって、内部構造の特定とアバランシェ過程モデル等の検証を行う。TCAD シミュレーションでは作製したデバイスの各



図 8: ビームライン内のチップキャリア

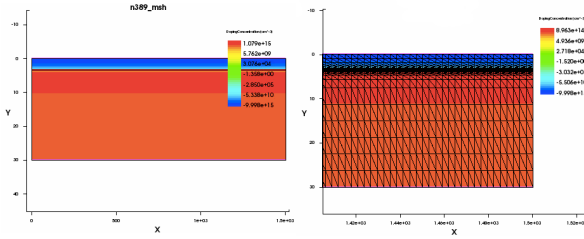


図 9: APD 構造作製

図 10: 構造メッシュ

格子点において、以下の 3 つの連立方程式を解くことによって電荷の時間・空間的变化を計算する。

ポアソン方程式

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e}{\epsilon} [p - n + N_d^+ - N_a^-] \quad (1)$$

電子・正孔電流連続方程式

$$\mathbf{J}_{n,p} = en\mu_{n,p}\mathbf{E} + eD_{n,p}\nabla n \quad (2)$$

生成再結合の式

$$\frac{\partial n}{\partial t}, \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}_{n,p} + G - R \quad (3)$$

表 1: 適用した物理モデル

Avalanche 増倍	van Overstraeten-de Man
キャリア寿命	$\tau_{a,max} = 1e^{-3}, 3e^{-4}[s]$

APD の内部構造に関する詳細は明らかでないが、C-V 測定の結果から、空乏層幅と容量の関係式 (4) を用いて、空乏層幅を見積もることが出来る。

$$C = S\epsilon_{si}/W \quad (4)$$

ただし、

$$S = 7.0[mm^2]$$

$$\epsilon_{si} = 11.9 \times 8.85 \times 10^{-12}[s^4 A^2 / m^3 kg]$$

である。また、三層階段接合における空乏層容量の式から、C-V 測定の結果を用いて各層の不純物密度が見積もられる。

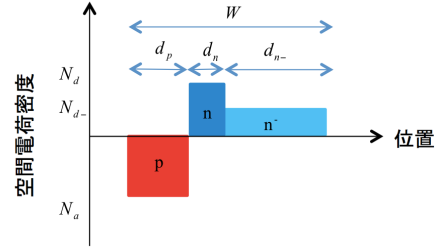


図 11: 三層階段接合の構造

$$C = S \left[ \frac{2}{e\epsilon_s} \left[ \frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] V \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$V < V_{lim}$

$$C = S \left[ \frac{2}{e\epsilon_s} \left[ \frac{N_a + N_{d-}}{N_a N_{d-}} \right] \left( V - \left( \frac{N_d - N_{d-}}{N_a + N_{d-}} \right) V_{lim} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$V > V_{lim}$

これらの計算により得られたオーダーを基準値として  $8 \times 5 \times 5 = 200$  通りの構造を TCAD 上で作製し、その I-V、C-V 特性を調べ実験値と比較した。

表 2: 作製した構造パターン

p 層 [ $/cm^3$ ]	n 層 [ $/cm^3$ ]	n-層 [ $/cm^3$ ]
5.00E+15	1.00E+15	1.00E+14
6.00E+15	2.00E+15	2.00E+14
7.00E+15	3.00E+15	3.00E+14
8.00E+15	× 4.00E+15	× 4.00E+14
9.00E+15	5.00E+15	5.00E+14
1.00E+16		
2.00E+16		
3.00E+16		

## 4 Results

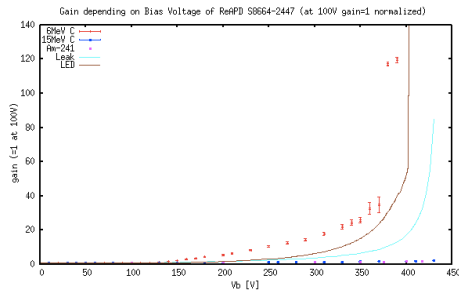


図 12: 重イオン照射時と LED 光照射時のゲイン

図 12 は、重イオン照射実験によるバイアス電圧に対するゲイン変化の結果で、高エネルギーである 15MeV 炭素イオンの照射では LED 光照射の場合と比較してゲインは下がり、更にエネルギー損失の深さによってもゲインの違いがあることが明らかになった。

表 3: 重イオンエネルギーの飛程とゲインの関係

Energy[MeV]	核種	range[ $\mu\text{m}$ ]	gain
6	C	5.86	大
15	C	14.5	小
5.4	$\alpha$	27.27	小

また、TCAD による構造作製の結果、最も実験値に近い IV・CV 特性を表す構造は  $N_a = 1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_d = 1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ,  $N_{d-} = 5 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  であった。この時の構造・特性をそれぞれ以下に示す。

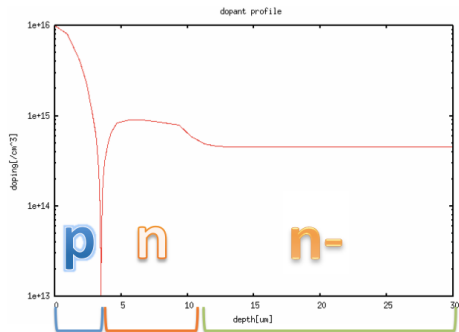


図 13: ドーパントプロファイル (不純物濃度勾配)

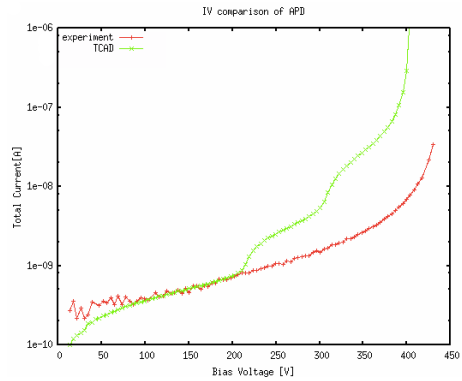


図 14: 実験と TCAD の IV 結果比較

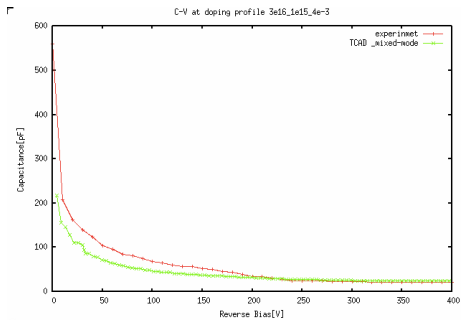


図 15: 実験と TCAD の CV 結果比較

## 5 Discussion

C-V 測定の結果から増幅に寄与する pn 接合領域が深さ  $10\mu\text{m}$  迄に存在することが見積もられた。一方、飛程がそれぞれ約  $5.86\mu\text{m}$  と約  $14.5\mu\text{m}$  の重イオン照射実験では、エネルギー損失の深さが  $10\mu\text{m}$  程度を超える場合、ゲインが著しく低下し予測と矛盾しない結果が得られた。現在各層での不純物濃度とその広がりの詳細を明らかにするために、特性について測定値とシミュレーション計算の比較を行っている。正確な構造とその過程モデルによって SEE の詳細が再現可能であると思われ、今後はシミュレーションと追加実験によるデータの精密化を行う。

## Acknowledgement

イオン照射実験は日本原子力研究開発機構の夏期実習生制度の下に行わせて頂きました。