

半導体の単一イオン照射効果と その評価システム

日本原子力研究開発機構
半導体耐放射線性研究グループ
小野田忍

[mailto: onoda.shinobu@jaea.go.jp](mailto:onoda.shinobu@jaea.go.jp)

コンテンツ

1. 背景

1. 放射線環境

2. 半導体の放射線照射効果

1. はじき出し損傷効果
2. トータルドーズ効果
3. シングルイベント効果(単一イオン照射効果)

2. Transient Ion Beam Induced Current (TIBIC)開発

3. TIBICによる評価例

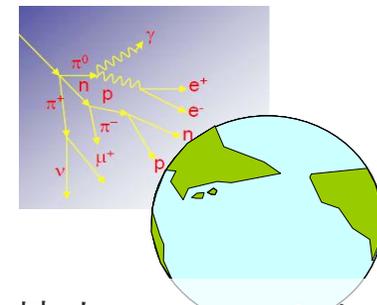
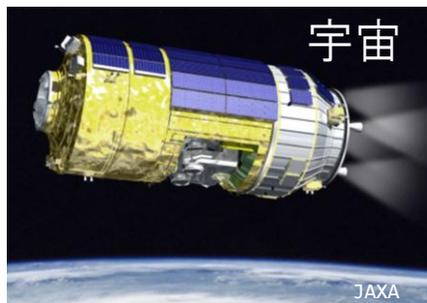
4. 開発中の測定システム

5. 半導体の照射効果研究以外への応用

6. おわりに

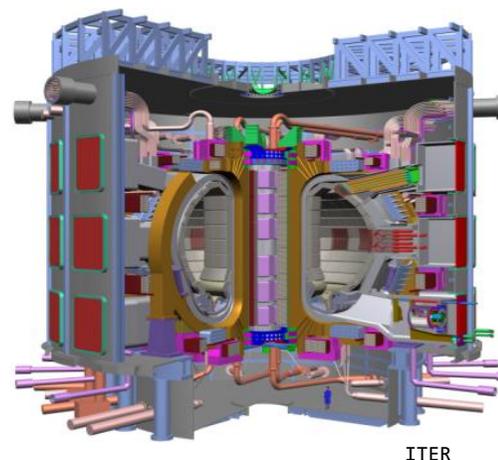
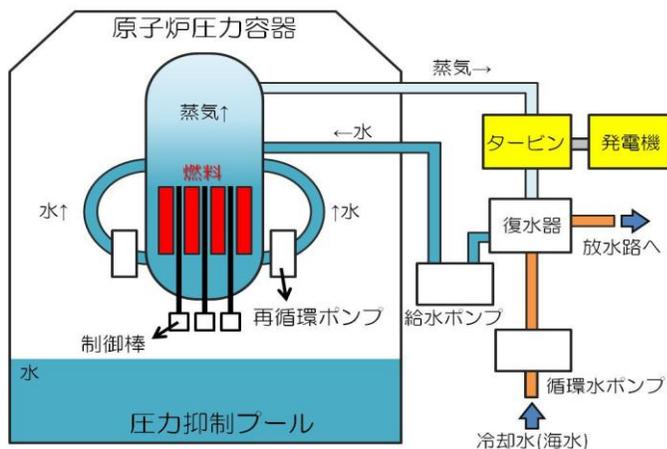
放射線環境

耐放射線性の半導体が要求される環境といえば、



そして、勿論、原子力や核融合施設

制御棒上下駆動機構
再循環ポンプ（原子炉内蔵）



東電福島第一原発事故でも必要な
緊急・事故時作業用ロボット

半導体の照射効果の最先端→宇宙

宇宙放射線環境

銀河宇宙線

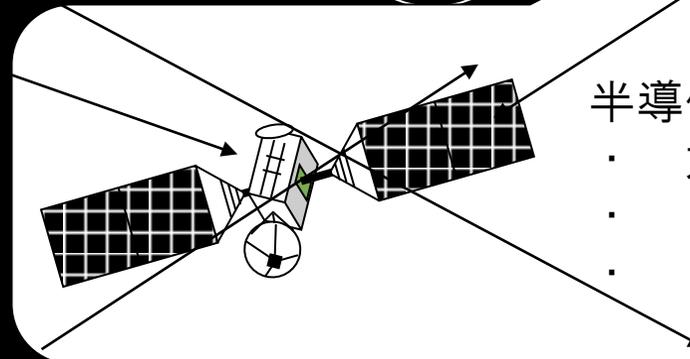
$p \cdot \alpha \cdot ion$

捕捉放射線

$p \cdot e$

太陽フレア放射線

$p \cdot e \cdot ion$



半導体素子

- ・ 太陽電池
- ・ ロジック
- ・ メモリ

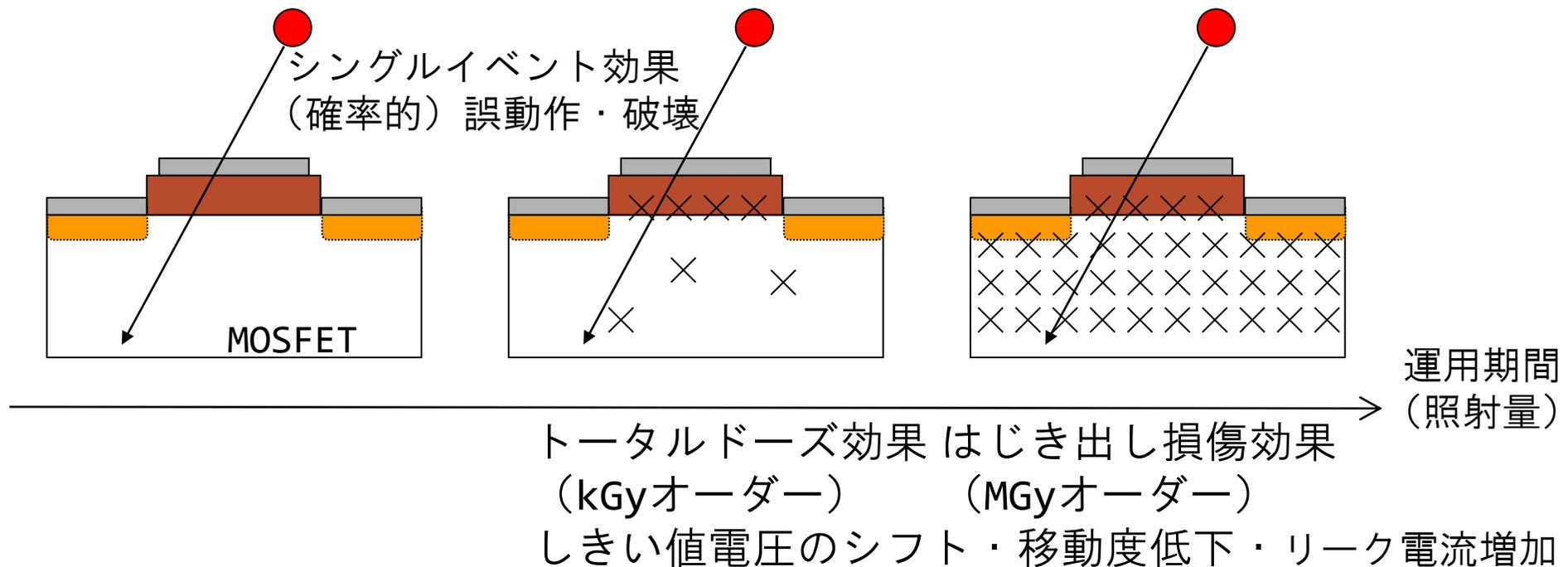
半導体に対する三つの放射線影響

- はじき出し損傷効果 (Displacement Damage Dose Effect)
 - ✦ **多量の放射線**が入射し、半導体結晶を構成する原子が定常位置からはじき出されることによって引き起こされる。はじき出された原子および空格子点は、欠陥準位を形成し、半導体の諸特性を劣化させる。バルク損傷 (Bulk Damage)とも呼ばれる。
- トータルドーズ効果 (Total Ionizing Dose Effect)
 - ✦ **多量の放射線**が入射し、**電離作用**によって引き起こされる。生成された電荷は、固定電荷や界面準位を形成し、半導体の諸特性を劣化させる。累積線量効果とも呼ばれる。
- シングルイベント効果 (Single Event Effect)
 - ✦ **1個の粒子**が入射し、**電離作用**により高密度の電荷が生成されることにより引き起こされる。生成された電荷が半導体素子中を流れることによって、一時的もしくは定常的な故障が起こる。

➡ 単一イオン照射効果

半導体に対する三つの放射線影響

- トータルドーズ効果 : 多量のガンマ線等 (酸化膜・電離)
- はじき出し損傷効果 : 多量の電子線等 (半導体結晶・はじき出し)
- シングルイベント効果 : 1個の重粒子 (半導体結晶・電離)



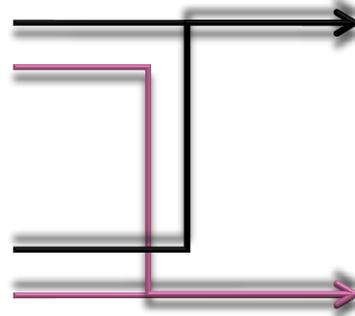
異なる放射線環境→異なる放射線影響

- 捕捉放射線
 - 陽子、電子

- 太陽フレア放射線
 - 陽子、電子

- 銀河宇宙線
 - GeV以上の高エネルギー重粒子

- 地上中性子線
 - 幅広いエネルギースペクトル



遮蔽によりX線・ガンマ線が発生し、ICのTIDを引き起こす。はじき出し断面積が小さいのでDDDは起こり難い。電子の電離能はSEEが起こるほど高くない。しかし、陽子はSEEを引き起こすこともある。

電子・陽子線が太陽電池のDDDを引き起こす。太陽電池には酸化膜がないので、原理的にTIDは起こらない。SEEも起こらない。

エネルギーが高く遮蔽ができない。フラックスが低いので、TIDもDDDも引き起こさない。ICのSEEを引き起こす。

核反応生成物（MeV級重粒子）がICのSEEを引き起こす。

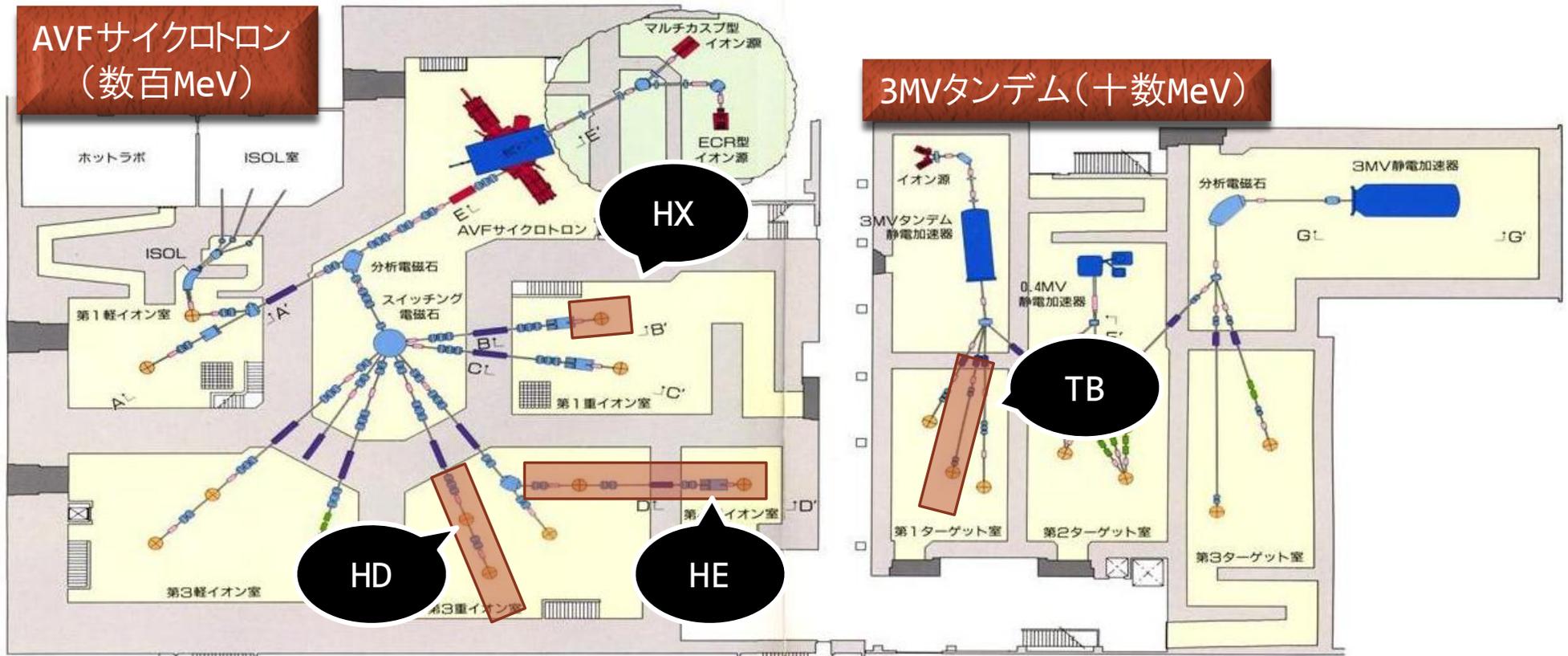
JAEA 高崎量子応用研究所の紹介



高崎量子応用研究所 群馬県高崎市綿貫町1233

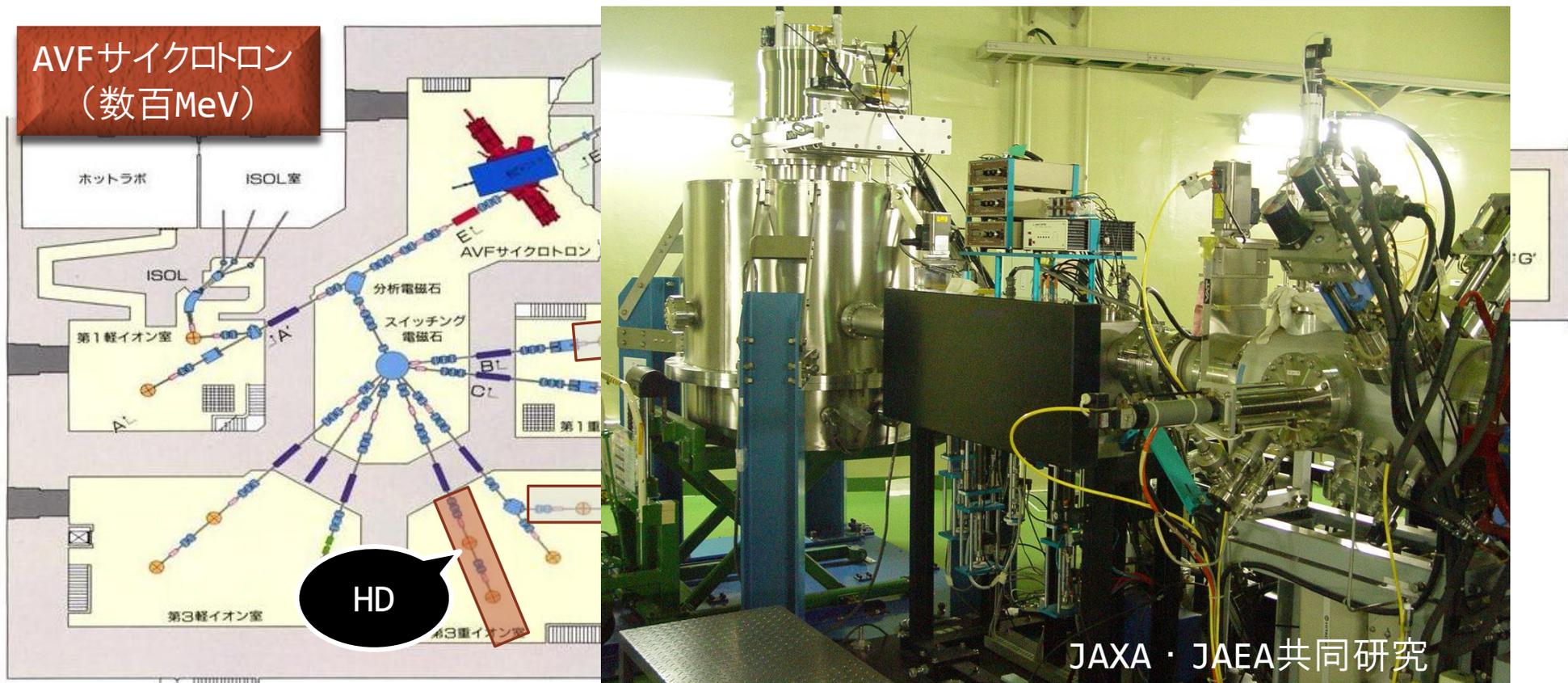
JAEA イオン照射施設の紹介

Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Applications



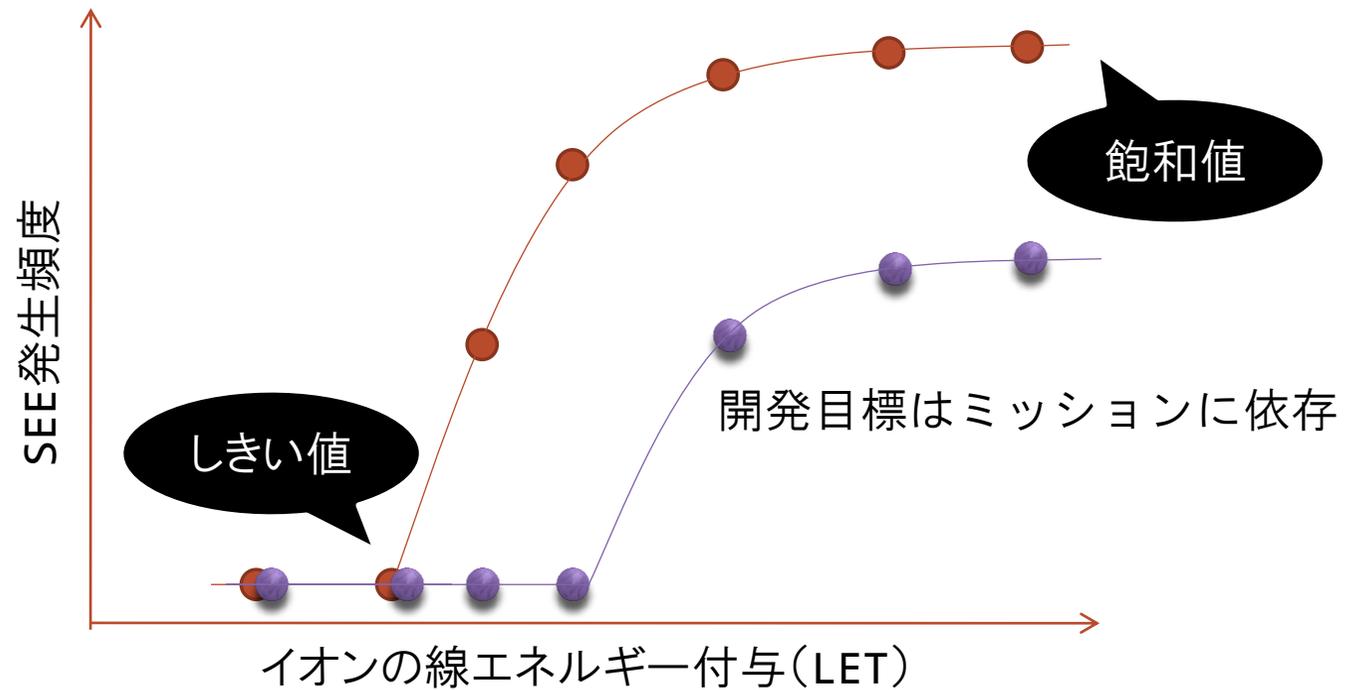
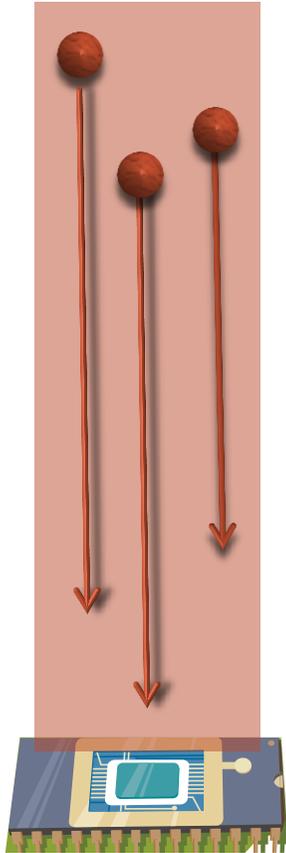
単一イオン照射効果の評価に使用している (た) ビームラインは4つ

一般的なSEE評価試験@HDコース



シングルイベント反転断面積

ブロードビーム



荷電粒子のLETが大きいほどシングルイベント効果は起こりやすい。

目標(JAXA-JAEA共同研究): 耐放射線性半導体素子(SOI-MPU、SOI-ASIC、SOI-FPGA、パワーデバイス etc.)を開発

耐放射線性(RH) vs 民生部品(COTS)

Memory (SRAM · DRAM · Flash etc.), FPGA, ASIC, MPU

RH開発

RH購入

COTS購入+試験

COTS購入

Table IV. Test Cost for an electronic device

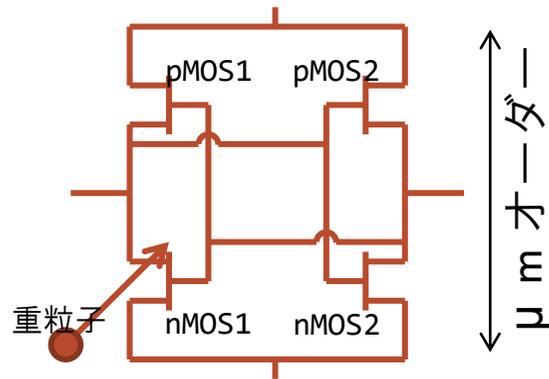
Radiation Test Costs for a Device				
Description	Man Months or # Units/Hours	Cost (\$)	Total (\$)	Note
Test Plan Development	0.25	\$ 25,000.00	\$ 6,250.00	Defines items to be included in test.
Device Purchase	30	\$ 100.00	\$ 3,000.00	Generic cost of item is not the driving factor.
Miscellaneous Parts	1	\$ 3,000.00	\$ 3,000.00	
De-lidding/Thinning	10	\$ 500.00	\$ 5,000.00	Required for advanced parts for SEE testing.
Daughter Board Design - Electrical	0.5	\$ 25,000.00	\$ 12,500.00	Assumes you will use existing mother boards and will design multipurpose use boards for TID, SEE, etc.
Daughter Board Design - PCB	0.5	\$ 20,000.00	\$ 10,000.00	
Test Board Fabrication	10	\$ 500.00	\$ 5,000.00	
Test Board Build	0.25	\$ 15,000.00	\$ 3,750.00	
Board/Tester Debug	0.25	\$ 15,000.00	\$ 3,750.00	
Test Software Development - Test Board	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00	
Test Software Development - Processor	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00	Can eliminate if it's not a processor (i.e. SRAM)
Radiation Expert Oversight	0.25	\$ 30,000.00	\$ 7,500.00	
Cobalt Source Rental	24	\$ 300.00	\$ 7,200.00	Assumes 24 hours of testing.
Heavy Ion Source Rental	24	\$ 750.00	\$ 18,000.00	Assumes 24 hours of testing.
Prompt Dose Test Facility Rental	16	\$ 300.00	\$ 4,800.00	Assumes 16 hours of testing.
Proton Source Test Facility	16	\$ 500.00	\$ 8,000.00	Assumes 16 hours of testing.
Test Manpower	0.7	\$ 20,000.00	\$ 14,000.00	Two people for 4 days plus travel time.
Travel Costs	8	\$ 1,000.00	\$ 8,000.00	Two people on four trips.
Data Analysis	0.5	\$ 30,000.00	\$ 15,000.00	Might be conservative with multiple tests.
Test Reports	0.5	\$ 20,000.00	\$ 10,000.00	
Total Cost			\$ 194,750.00	

Ref. 2009 IEEE NSREC Short Course
Section I, Programmatic Aspects Overview
J. W. Stone

JAEAで何を評価するシステムを開発するか？

1990年後半～2000年代前半

SRAM・DRAMのシングルイベントアップセット（メモリ反転）



ツール：マイクロビーム

目標：シングルイオンをマイクロメートルの位置精度で狙った位置に照射し、シングルイベント効果を評価できるシステムの開発

2000年～現在

集積メモリセル・トランジスタ << ビーム

パワーデバイス > ビーム

目標：炭化ケイ素（SiC：Silicon Carbide）パワーデバイスのSEE発生メカニズムを解明する。

目標：新しい計測システムの開発

目標：新しい応用先

コンテンツ

1. 背景

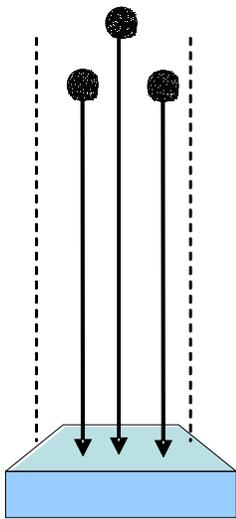
1. 放射線環境
2. 半導体の放射線照射効果
 1. はじき出し損傷効果
 2. トータルドーズ効果
 3. シングルイベント効果(単一イオン照射効果)

2. Transient Ion Beam Induced Current (TIBIC)開発

3. TIBICによる評価例
4. 開発中の測定システム
5. 半導体の照射効果研究以外への応用
6. おわりに

単一イオン照射のためのビーム技術

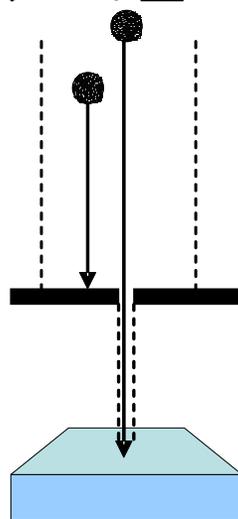
ブロードビーム



HD

最も一般的な照射

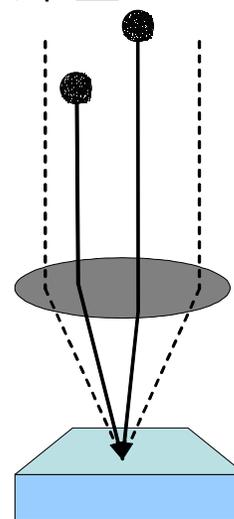
コリメート型ビーム



HE

微小領域を狙い撃ちする

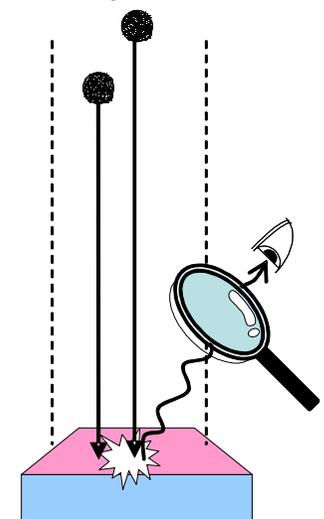
集束型ビーム



TB

HX

ブロードビーム



HE

開発中

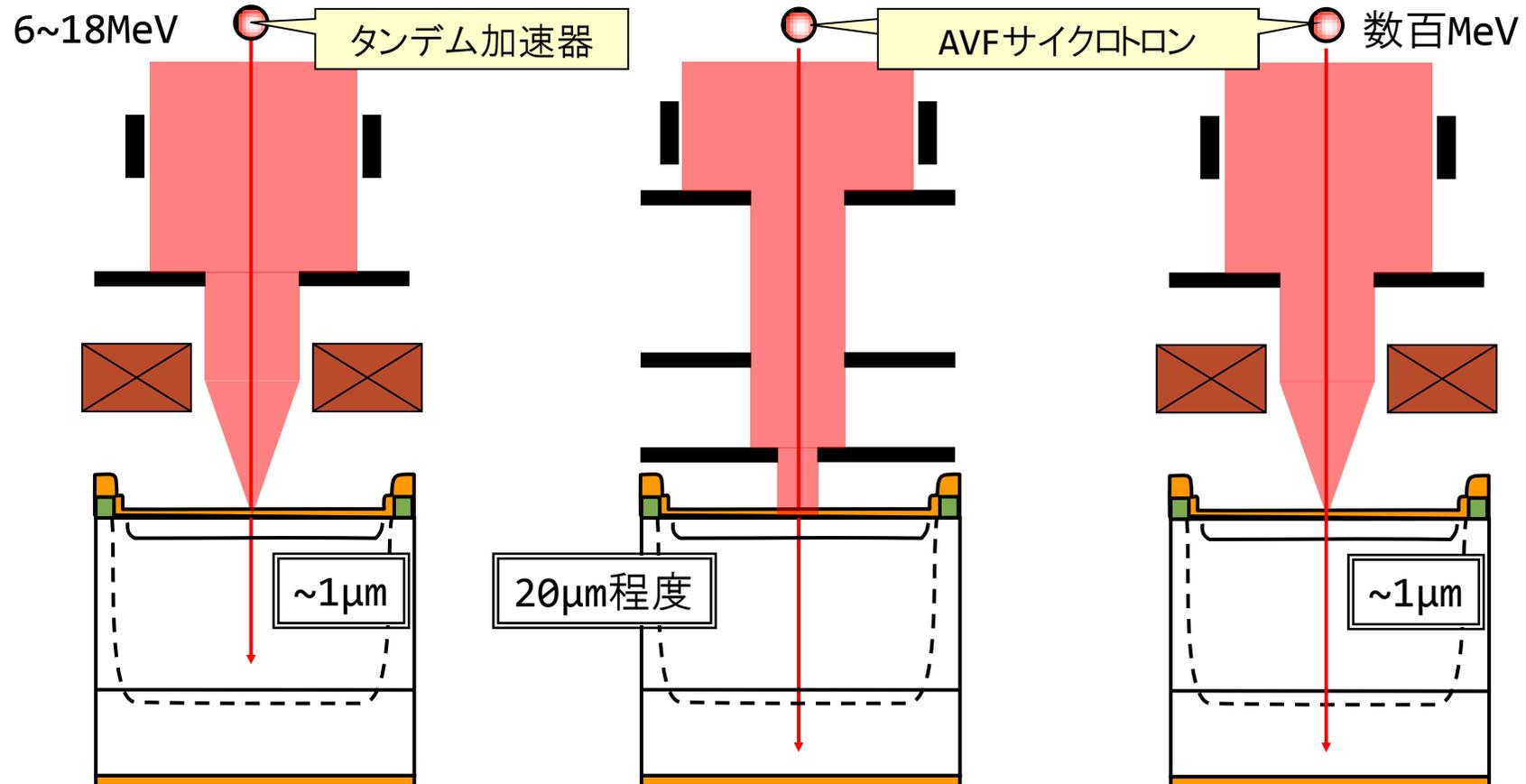
当たった場所を検出する

マイクロビームを用いた評価試験法

TB：集束型マイクロビーム

HE：コリメート型ビーム

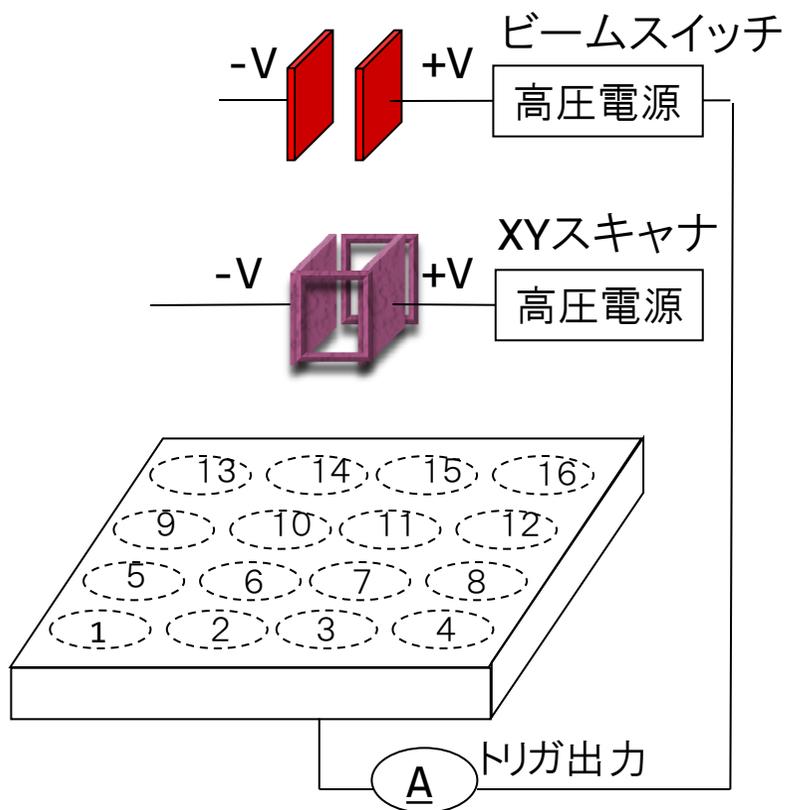
HX：集束型マイクロビーム



TIBIC(Transient Ion Beam Induced Current)システム

TIBICシステムの概要

重イオン1つだけ狙った位置に打ち込むシステム

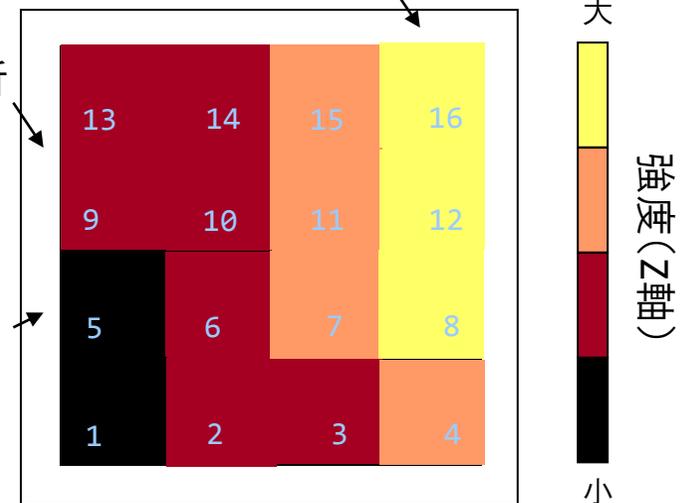


PC出力されるイメージ

大きな電流が発生した場所
(SE耐性が低い場所)

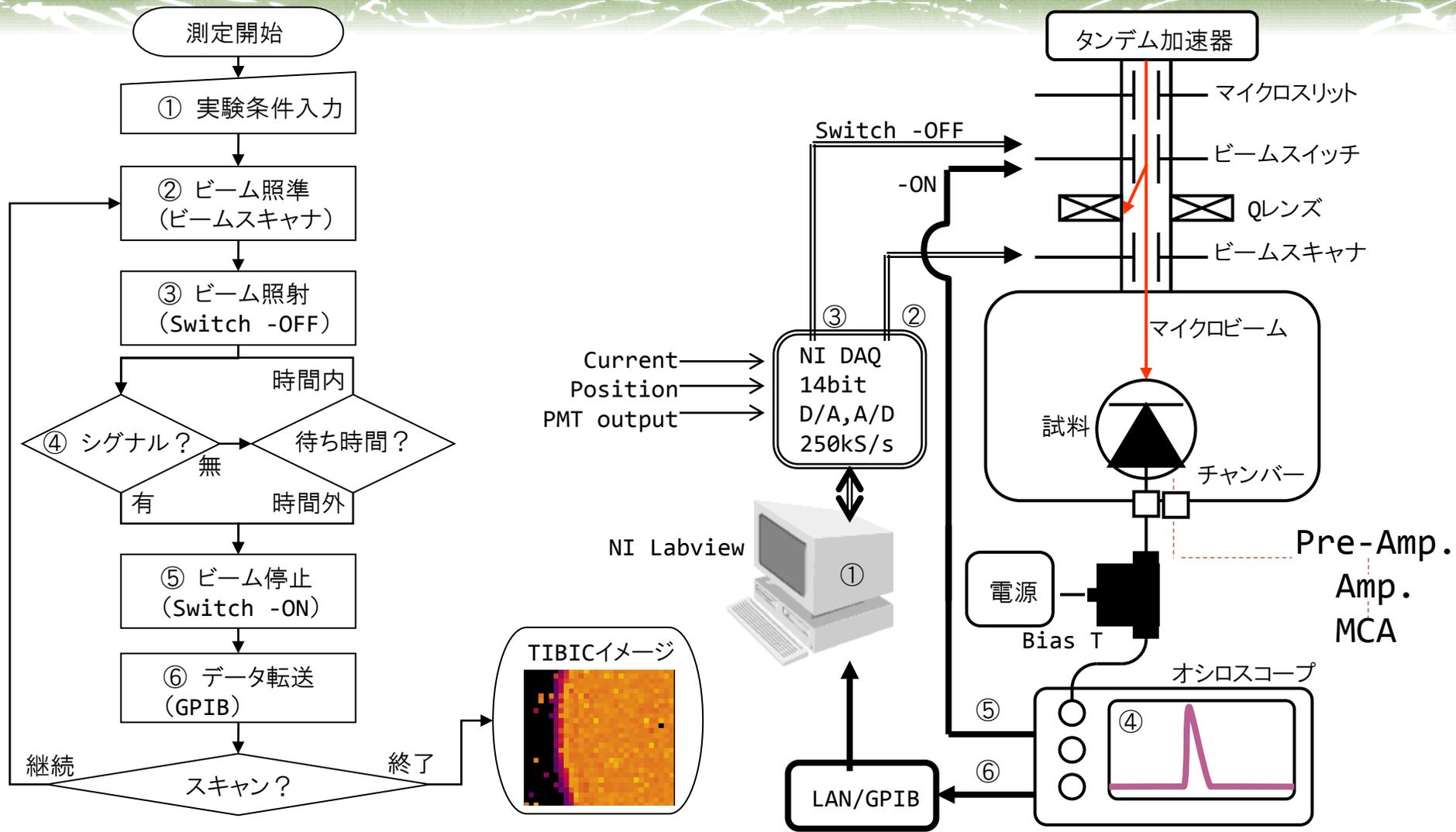
小さな電流が発生した場所

電流が発生しない場所
(SE耐性が高い場所)



照射位置はXYスキャナの電圧値から計算できる。各照射位置で信号が発生した場合、その強度に応じた色(Z軸)をつける。

TIBICシステムの詳細@TB



コンテンツ

1. 背景

1. 放射線環境

2. 半導体の放射線照射効果

1. はじき出し損傷効果
2. トータルドーズ効果
3. シングルイベント効果(単一イオン照射効果)

2. Transient Ion Beam Induced Current (TIBIC)開発

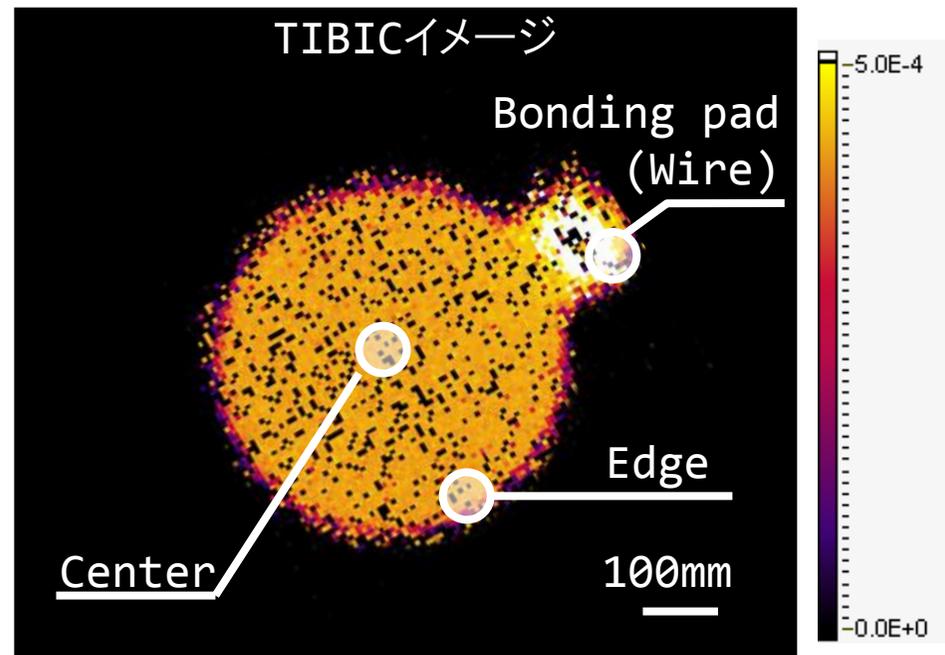
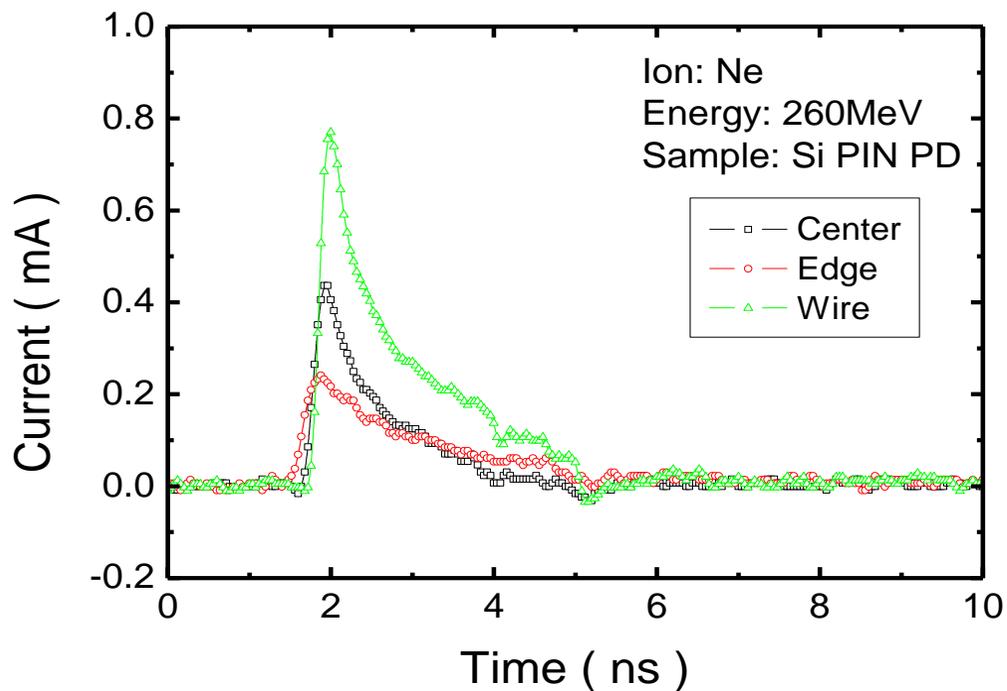
3. TIBICによる評価例

4. 開発中の測定システム

5. 半導体の照射効果研究以外への応用

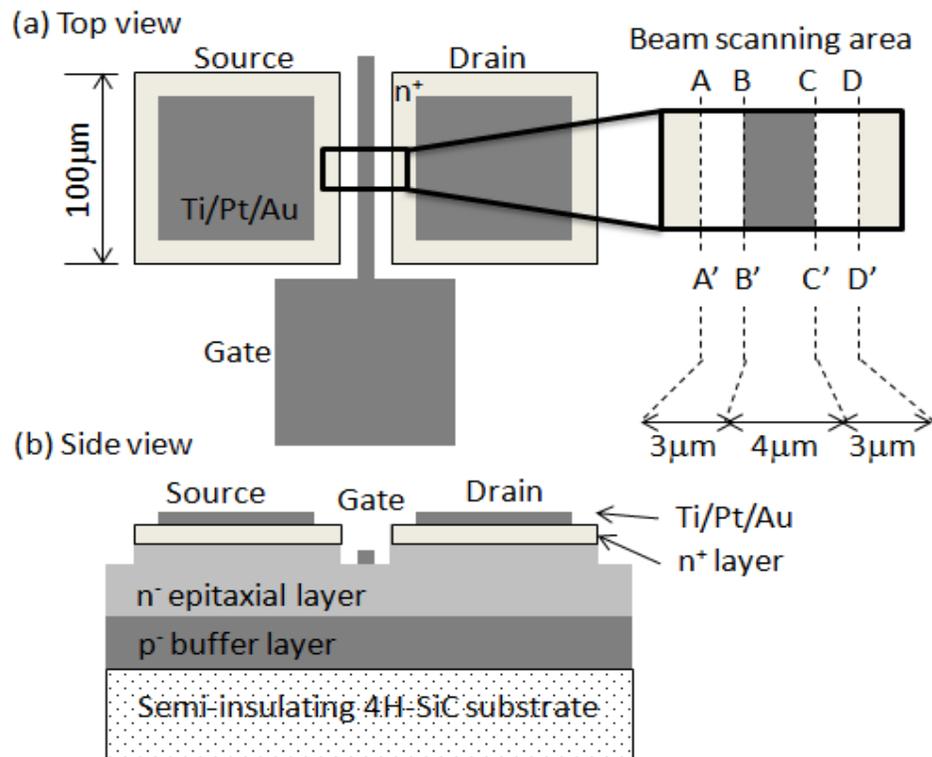
6. おわりに

TIBIC測定例 (Si PINフォトダイオード)

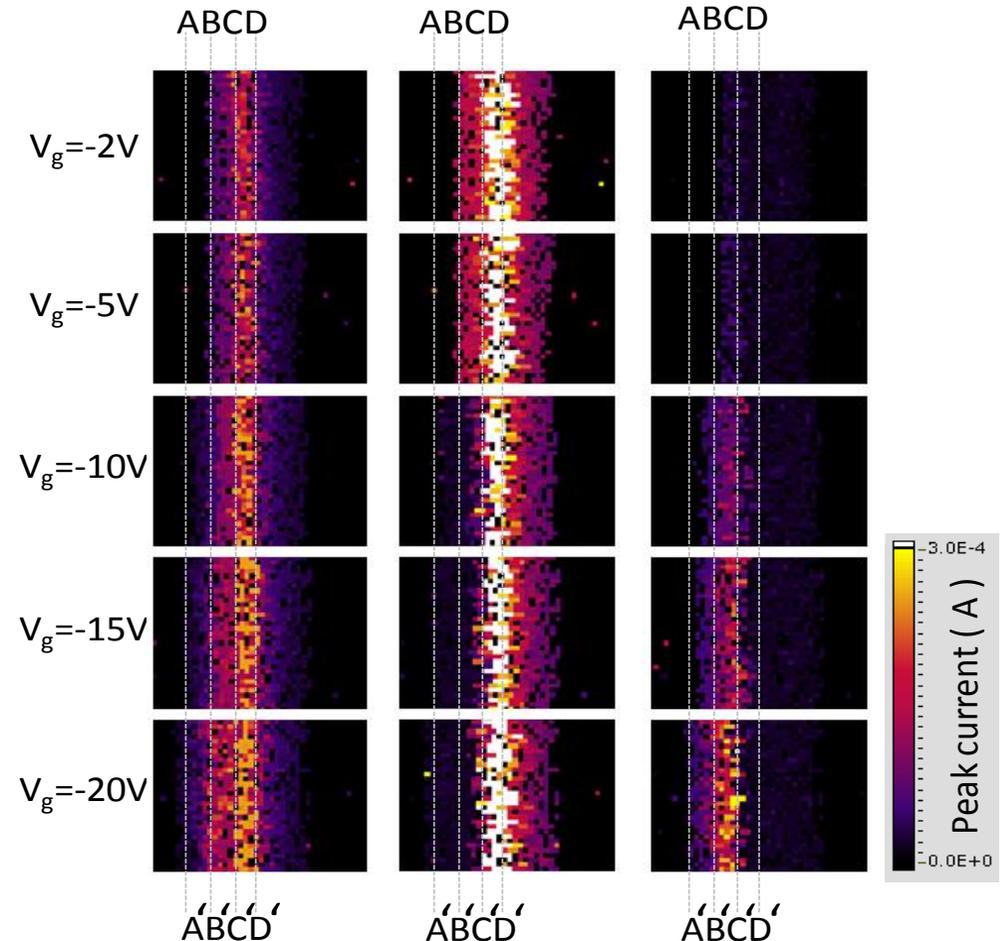


TIBIC測定例 (SiC MESFET)

Ref. S. Onoda, IEEE TNS 2012

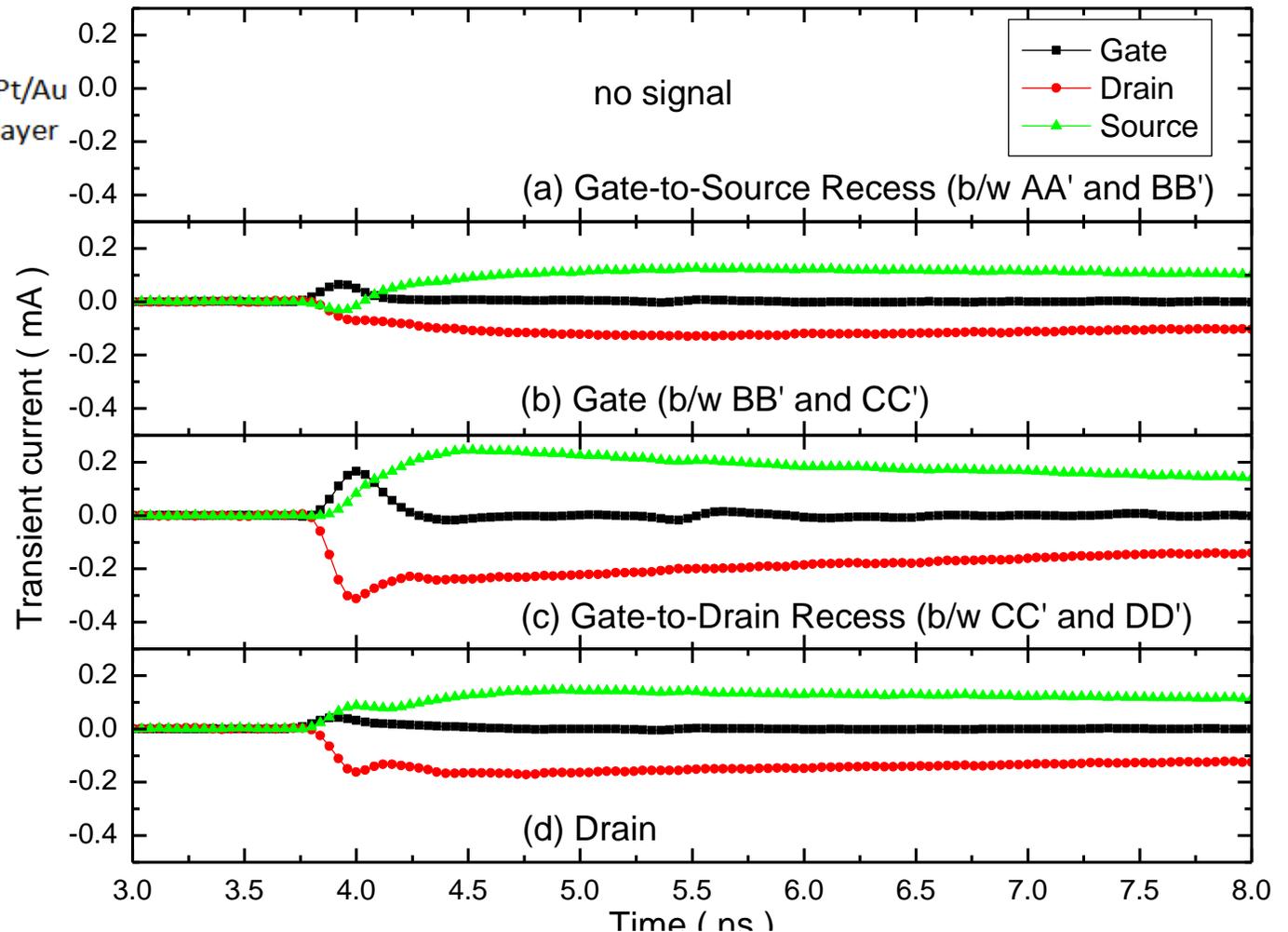
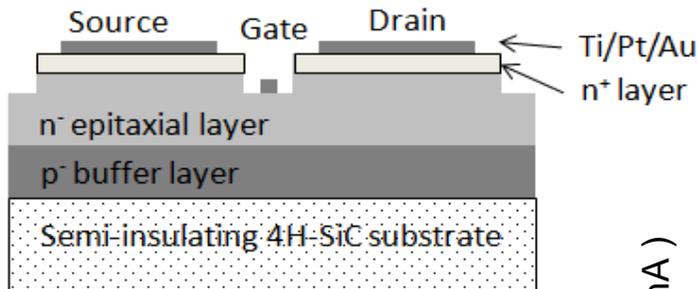


(a) gate signal (b) drain signal (c) source signal



数千倍の増幅効果の発現

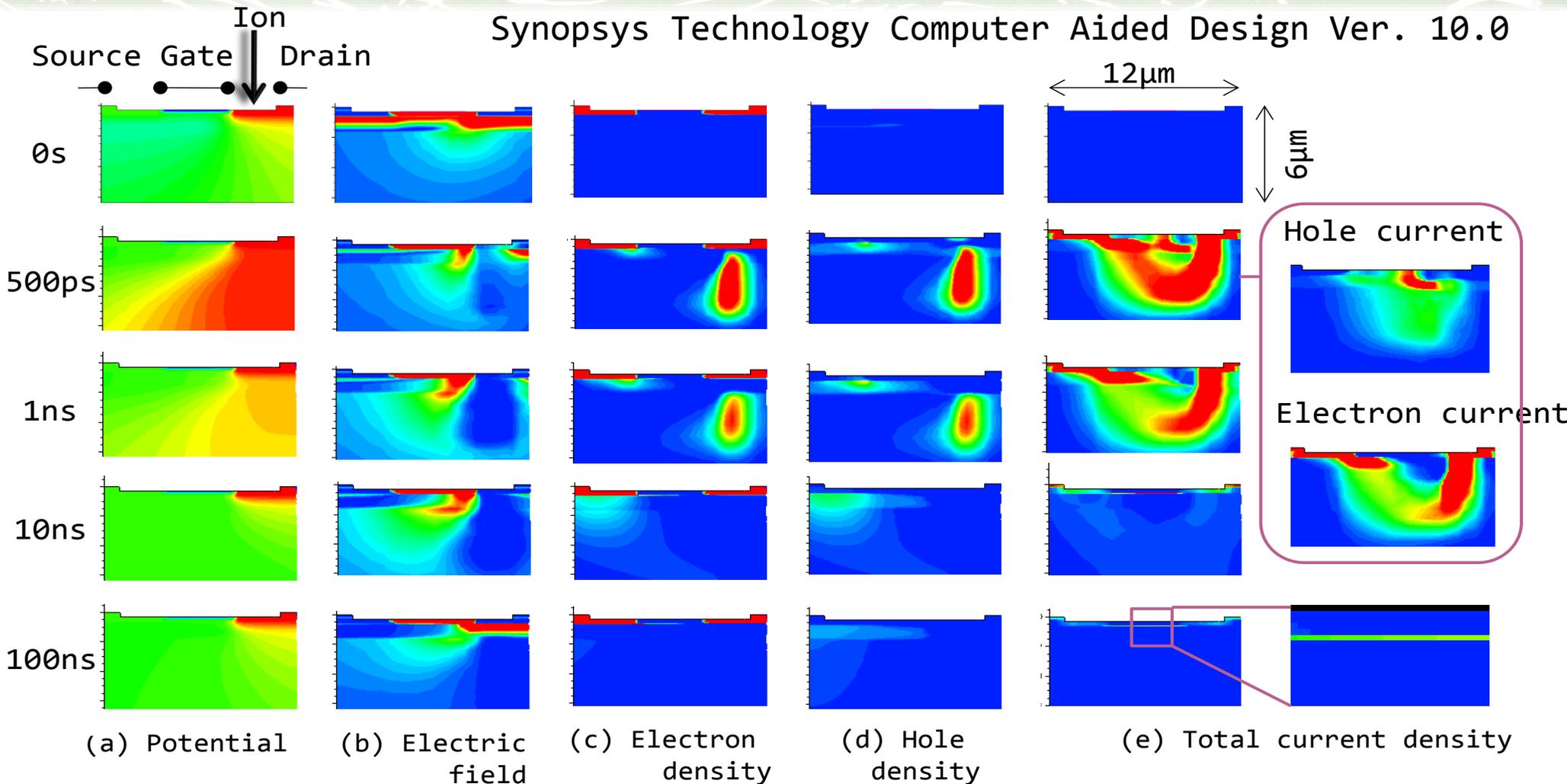
Ref. S. Onoda, IEEE TNS 2012



デバイスシミュレーション

Ref. S. Onoda, IEEE TNS 2012

Synopsys Technology Computer Aided Design Ver. 10.0



コンテンツ

1. 背景

1. 放射線環境

2. 半導体の放射線照射効果

1. はじき出し損傷効果
2. トータルドーズ効果
3. シングルイベント効果(単一イオン照射効果)

2. Transient Ion Beam Induced Current (TIBIC)開発

3. TIBICによる評価例

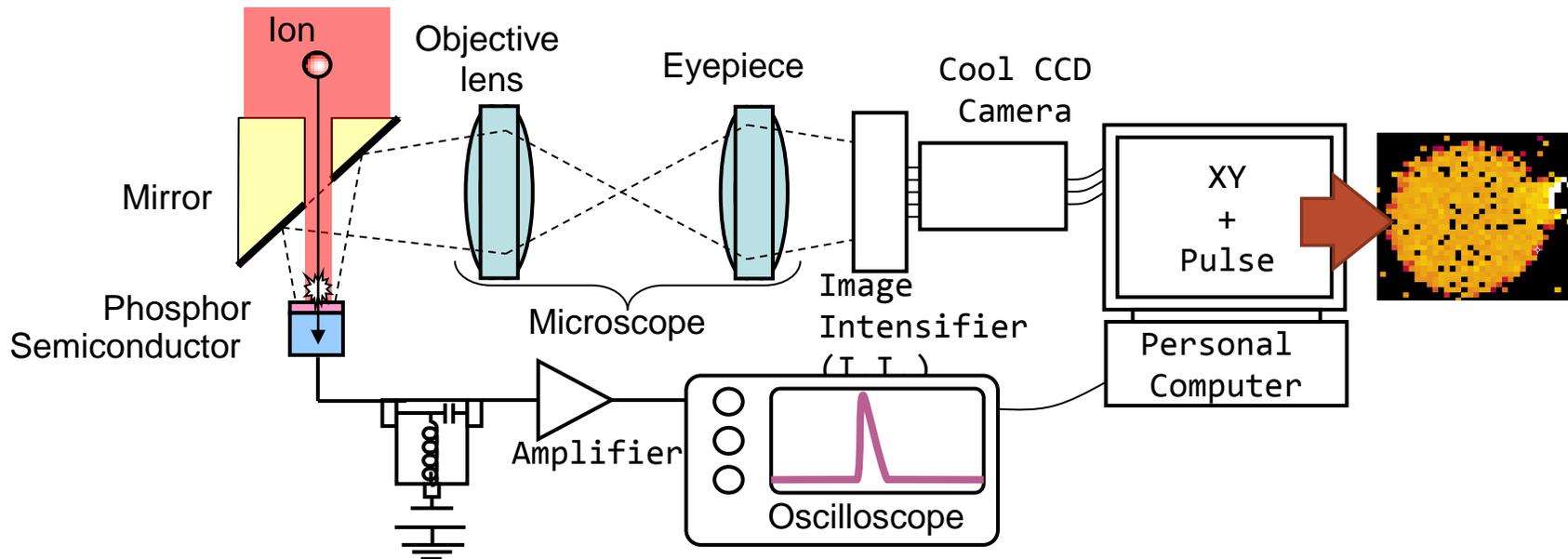
4. 開発中の測定システム

5. 半導体の照射効果研究以外への応用

6. おわりに

開発目標の装置(IPEM)

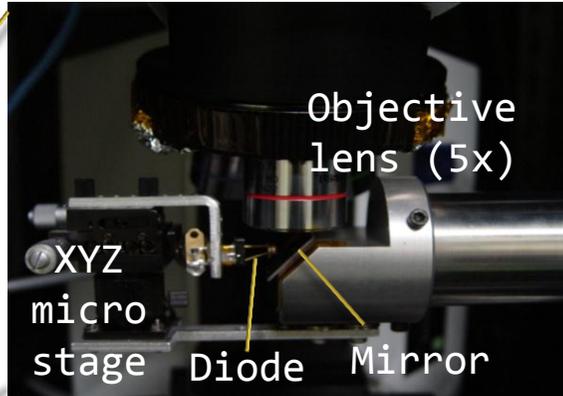
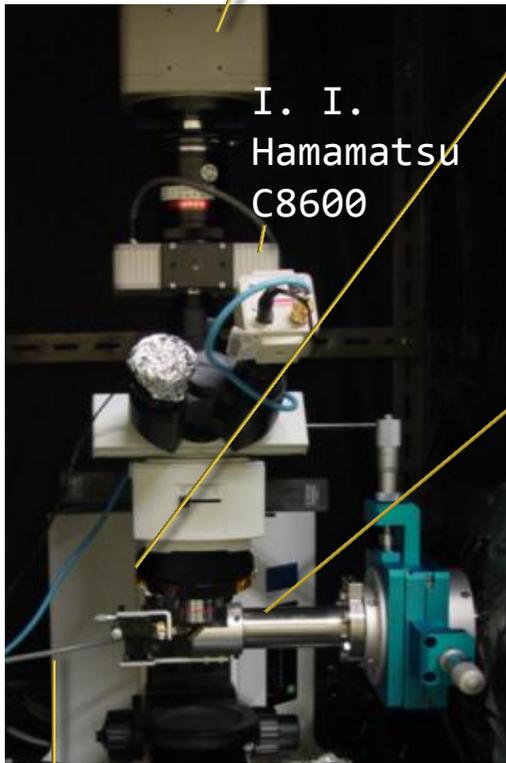
- マイクロビームを用いた過渡電流の計測システム
 - 特徴: 微小領域を狙い撃ち
 - 欠点: ビーム形成に長時間の調整が必要
 - 欠点: 利用できるイオンが限られている
- 開発する計測システム
 - 特徴: 当たった場所を検出する---IPEM(Ion Photon Emission Microscopy)



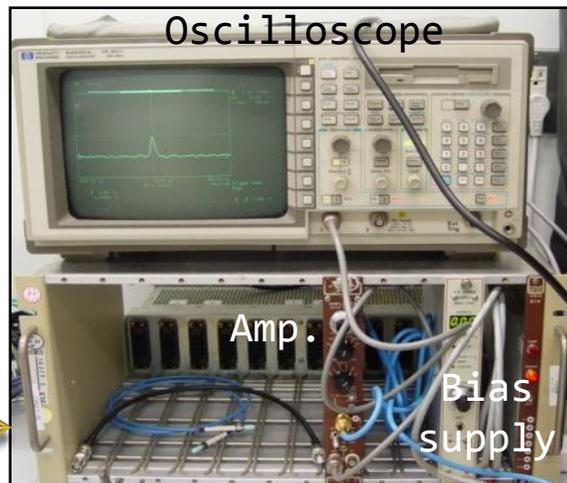
セットアップ

Cool CCD Camera
Hamamatsu C4880

I. I.
Hamamatsu
C8600



Objective lens (5x)
XYZ micro stage
Diode
Mirror

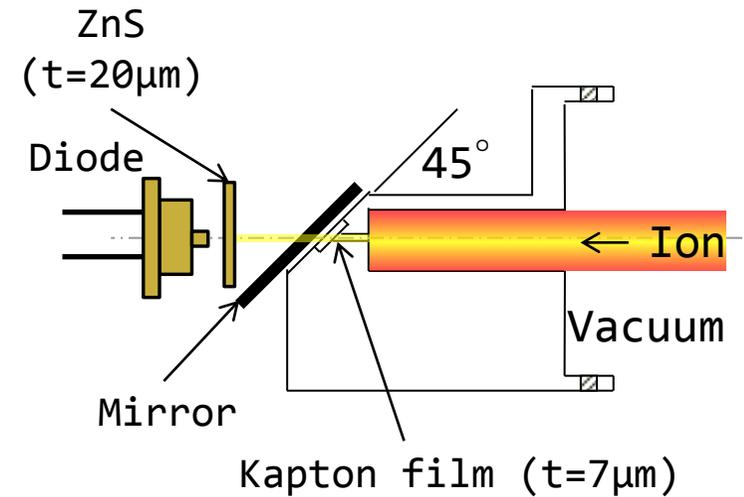


Oscilloscope

Amp.

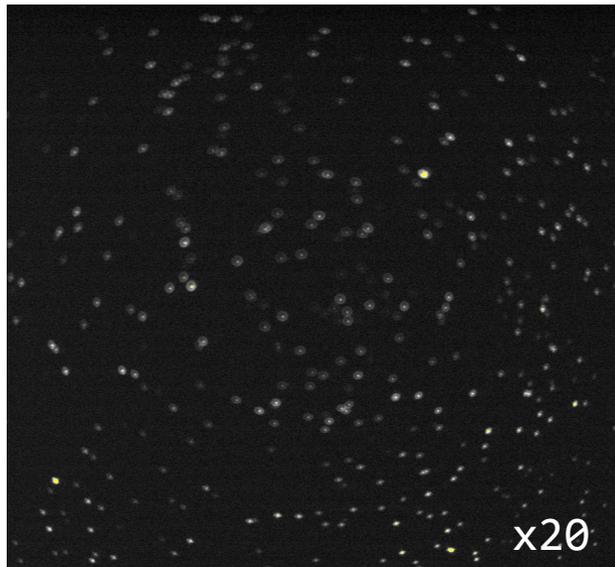
Bias supply

To
oscilloscope



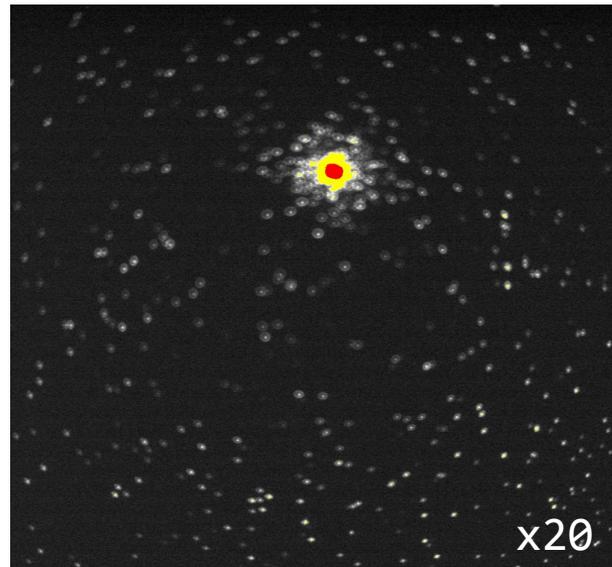
ZnSによるイオン誘起発光の検出

ノイズ

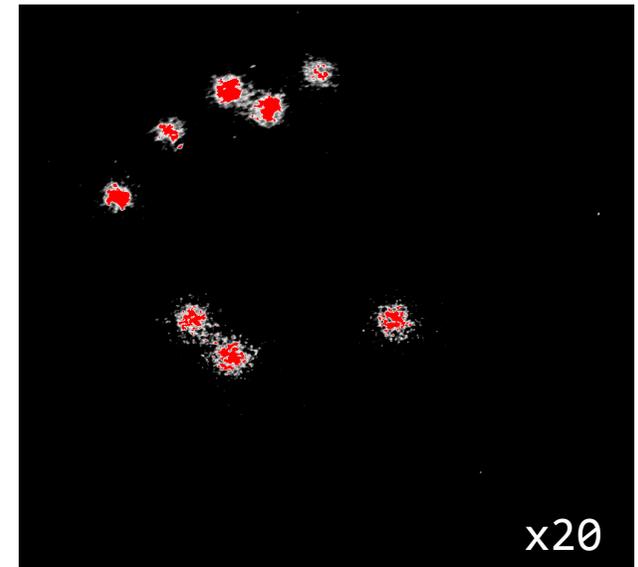


全面がZnS

150MeV-Arの発光

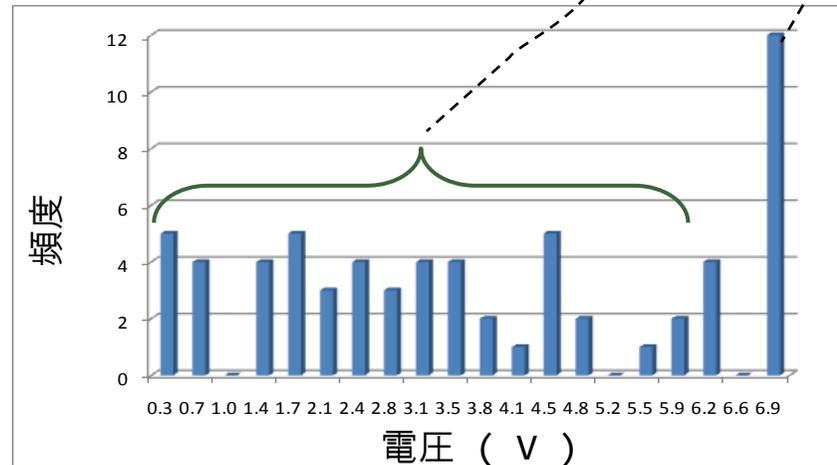
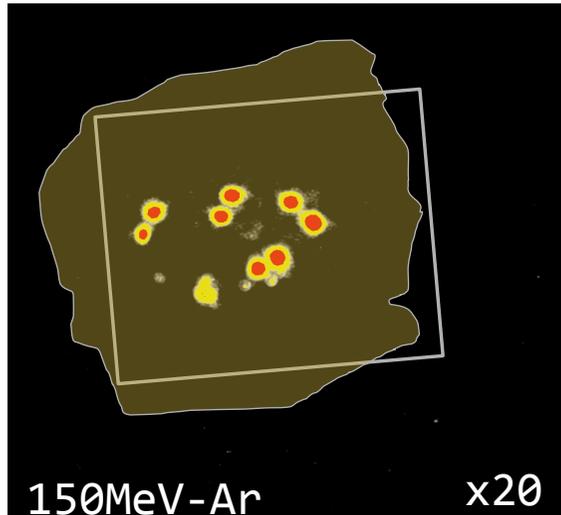
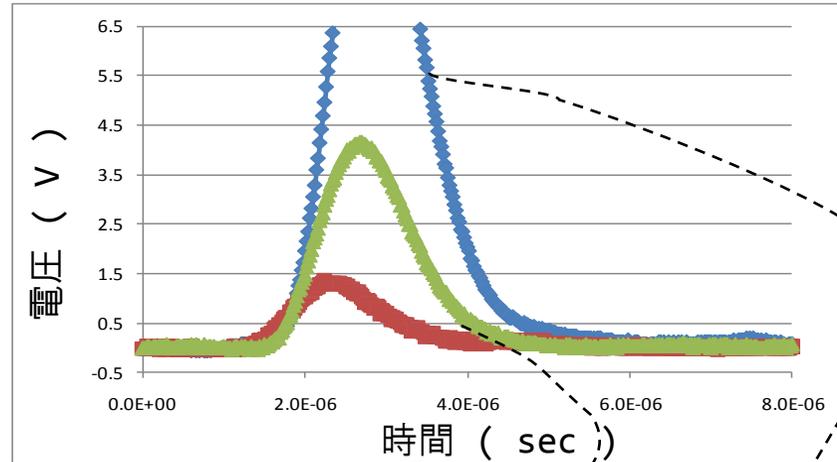
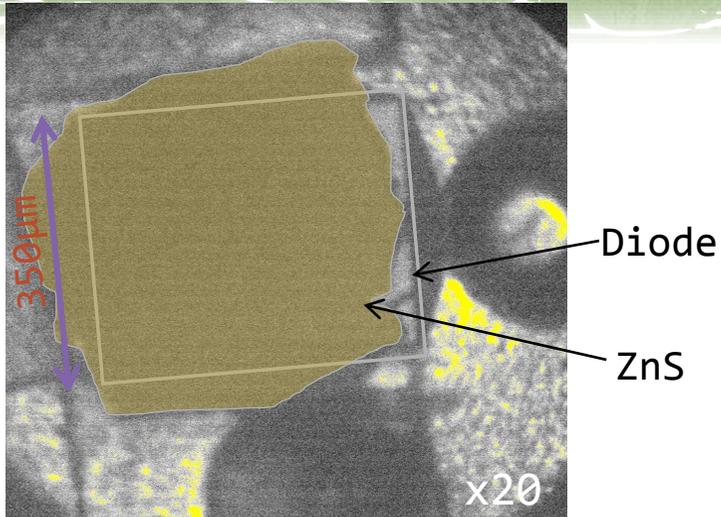


5.5MeV-Heの発光
(ノイズ除去後)



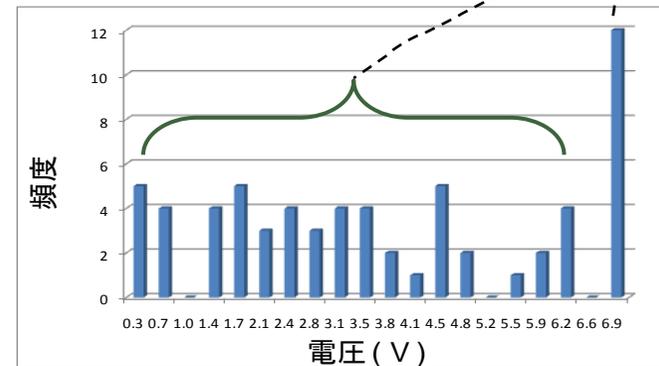
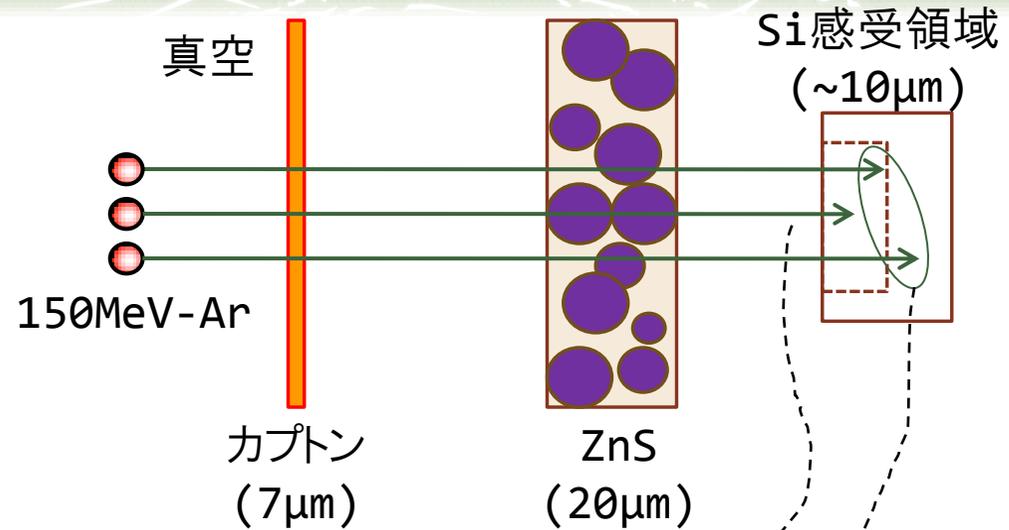
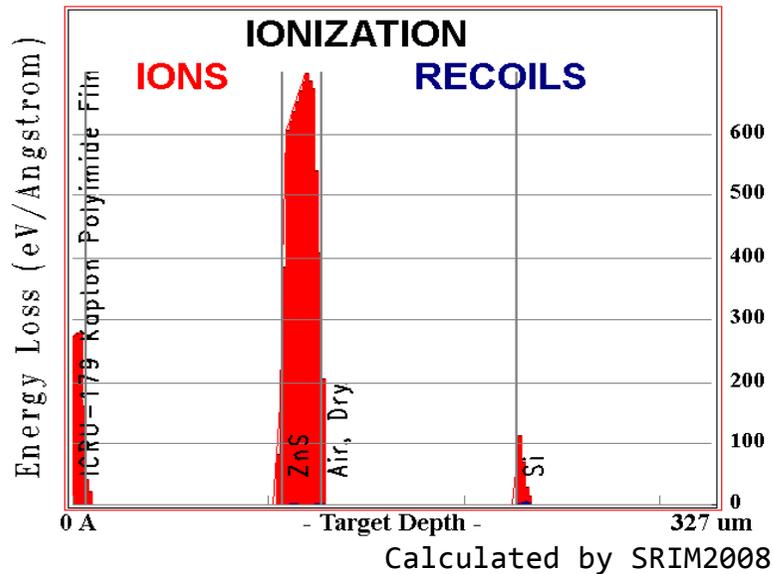
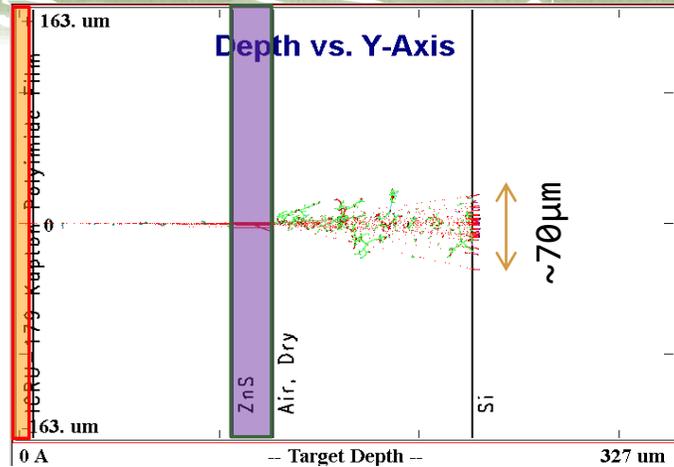
Diodeによるイオン誘起電荷の検出

1個のイオンが誘起する電荷量(\propto 電圧)



様々なエネルギーのイオンがダイオードに入射

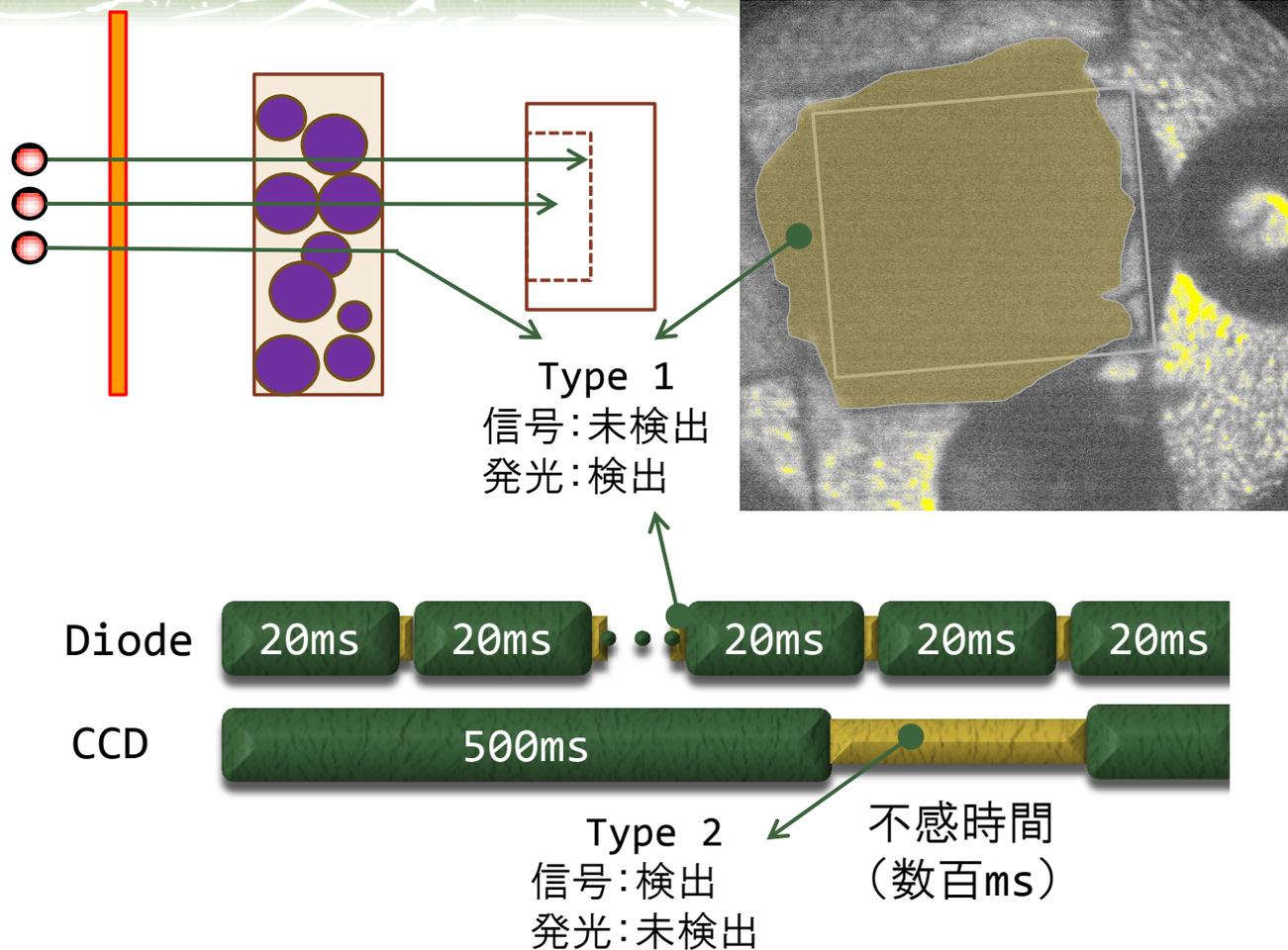
150MeV-Arのエネルギー損失



薄い&エネルギー損失が小さい発光体の模索が課題

電荷と光の検出の関係

Diode	CCD	Error
1	1	
1	0	Type 2
1	1	
1	1	
3	0	Type 2
1	1	
2	2	
1	1	
1	1	
1	1	
1	2	Type 1
1	1	
1	0	Type 2
1	0	Type 2
2	2	
1	1	
1	1	
1	0	Type 2
0	1	Type 1
1	1	
1	1	
23	18	35%



・概ね1対1の関係にあるが、今後の検証が必要
 ・XYの高速検出・読出しが必要

コンテンツ

1. 背景

1. 放射線環境

2. 半導体の放射線照射効果

1. はじき出し損傷効果
2. トータルドーズ効果
3. シングルイベント効果(単一イオン照射効果)

2. Transient Ion Beam Induced Current (TIBIC)開発

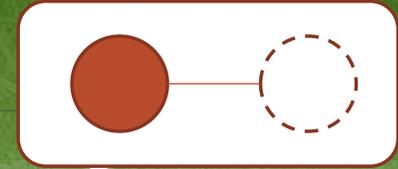
3. TIBICによる評価例

4. 開発中の測定システム

5. 半導体の照射効果研究以外への応用

6. おわりに

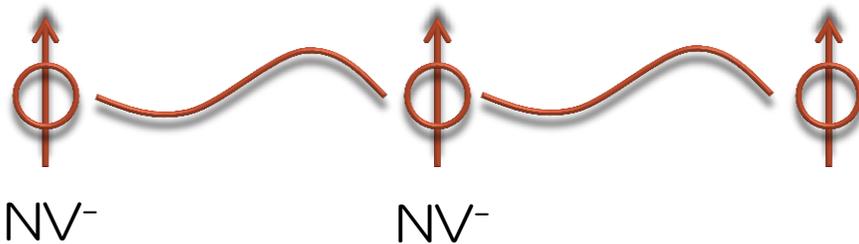
ダイヤモンド中のNV中心



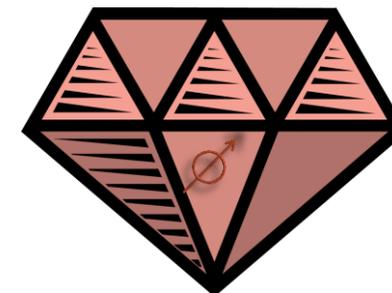
耐放射線性研究を通じて培った照射技術をダイヤモンド中の窒素・欠陥（NV）中心の作成エンジニアリングに供する

室温で動作する
量子情報素子

磁気センサ



T_2 : 10ms 以上、50nm間隔



感度 $\propto \sqrt{NT_2}$

コヒーレンス時間を損なわずに

配列状にNV中心を作成する

高濃度にNV中心を作成する

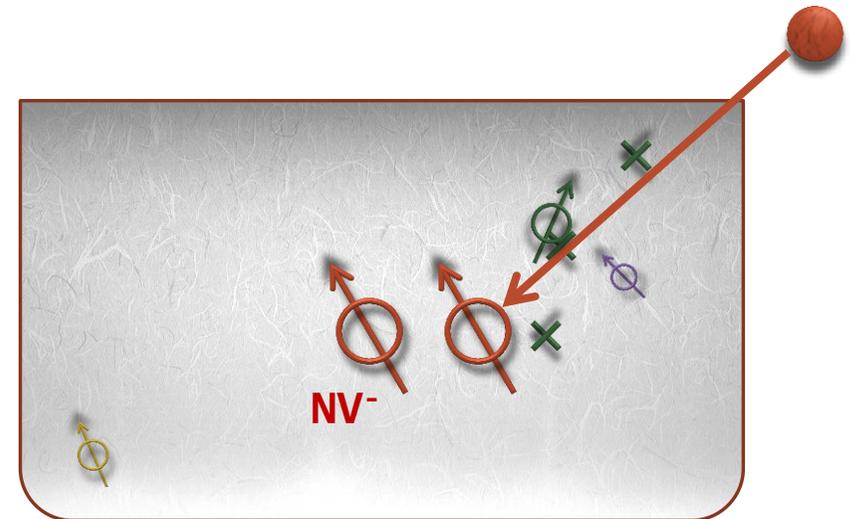
コヒーレンス時間 (T_2)

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_2}$$

^{13}C flip-flop Nitrogen impurity Dislocation & Defect Spin-lattice relaxation



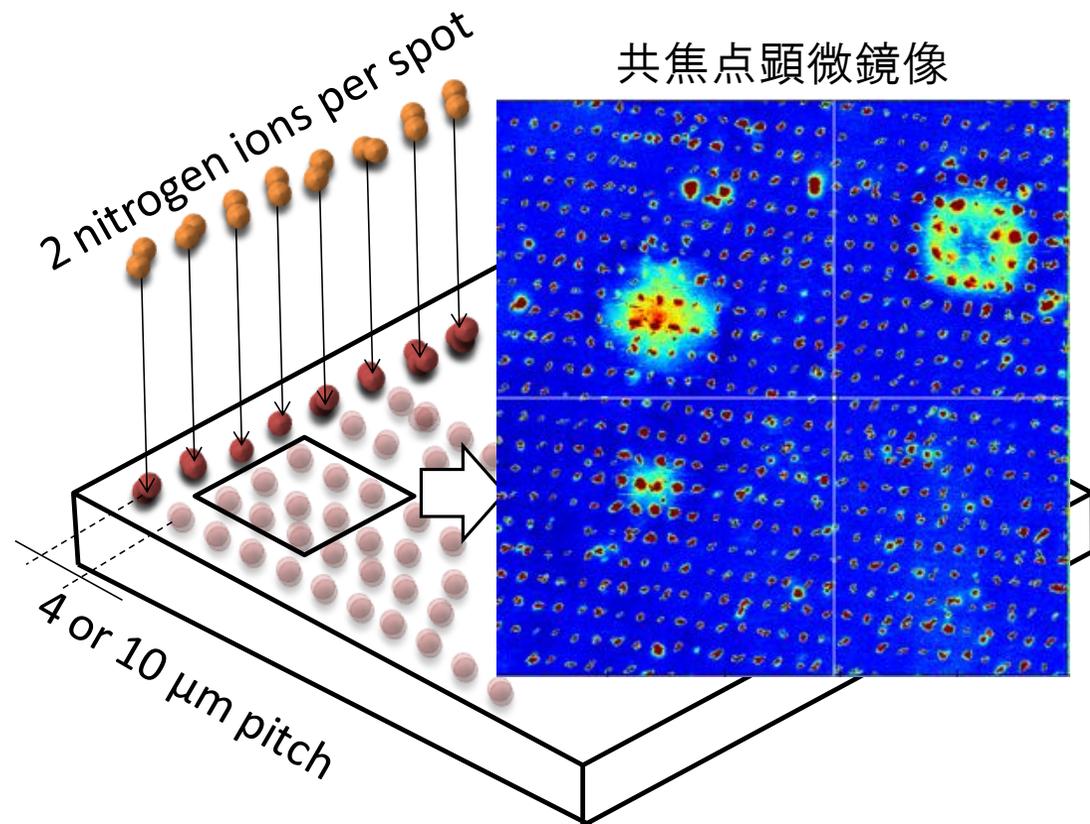
- High ^{13}C conc. (1.1%)
- High nitrogen impurity conc.
- High dislocation conc.



- Low ^{13}C conc. (0.001%)
- Low nitrogen impurity conc.
- Low dislocation conc.

マイクロビーム注入 (10MeV)

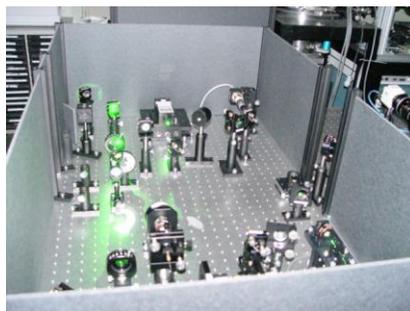
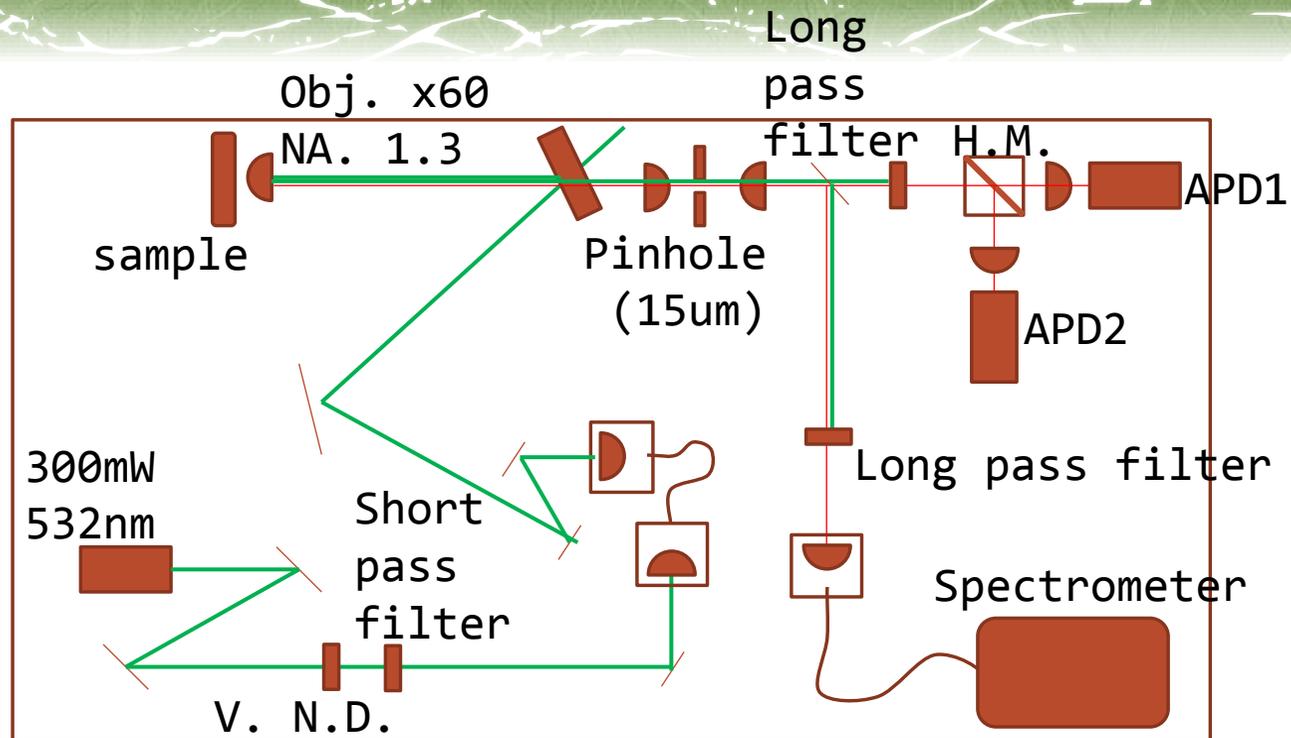
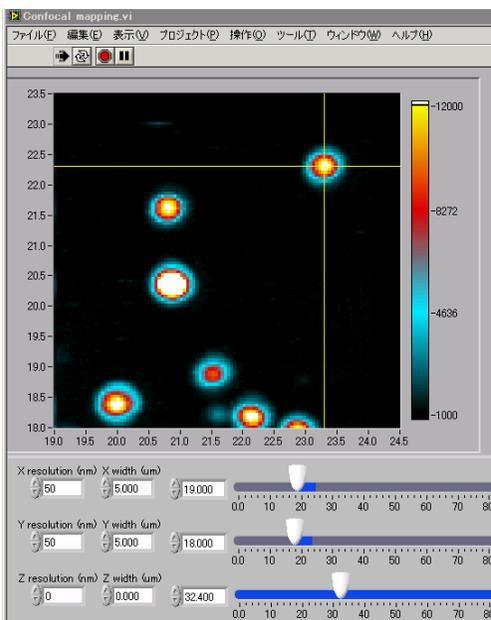
10MeV ^{14}N ion implantation @ RT & 1000°C annealing



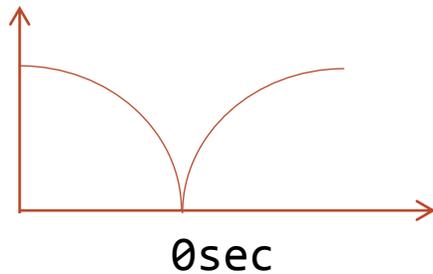
半導体に単一イオンをマイクロメートルの分解能で照射し、過渡応答を調べる

共焦点顕微鏡のセットアップ

NI Labview
DAQ (16bit D/A)



どのように単一NVを確認する？



Anti-bunching評価用PCIボード

PicoHarp 300: 27,000.00 Euro

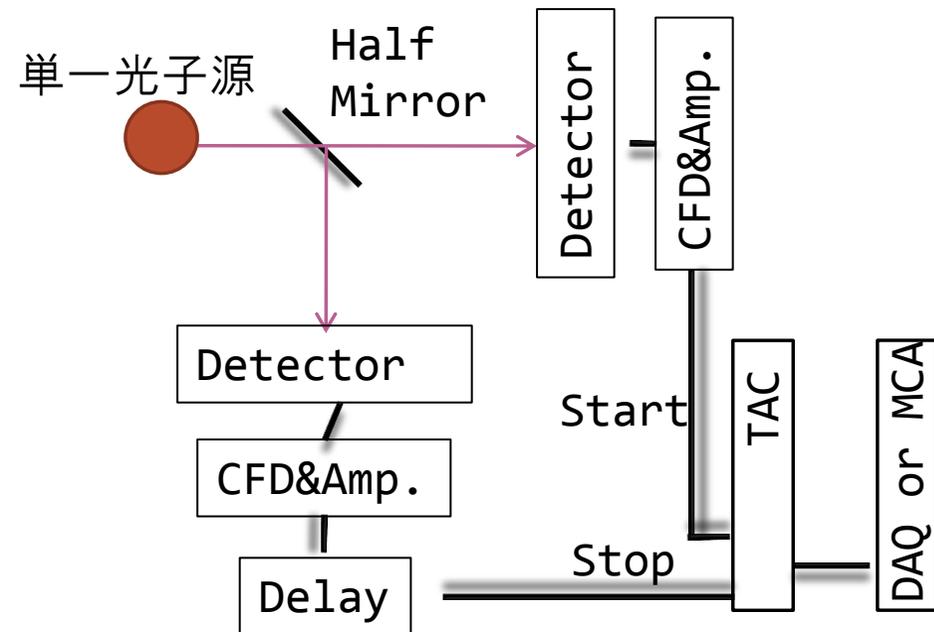
SPC-130: 16,000.00 Euro

NIM modules:

- TAC (Time Amplitude Converter)
- Delay line
- CFDs
- Amplifiers

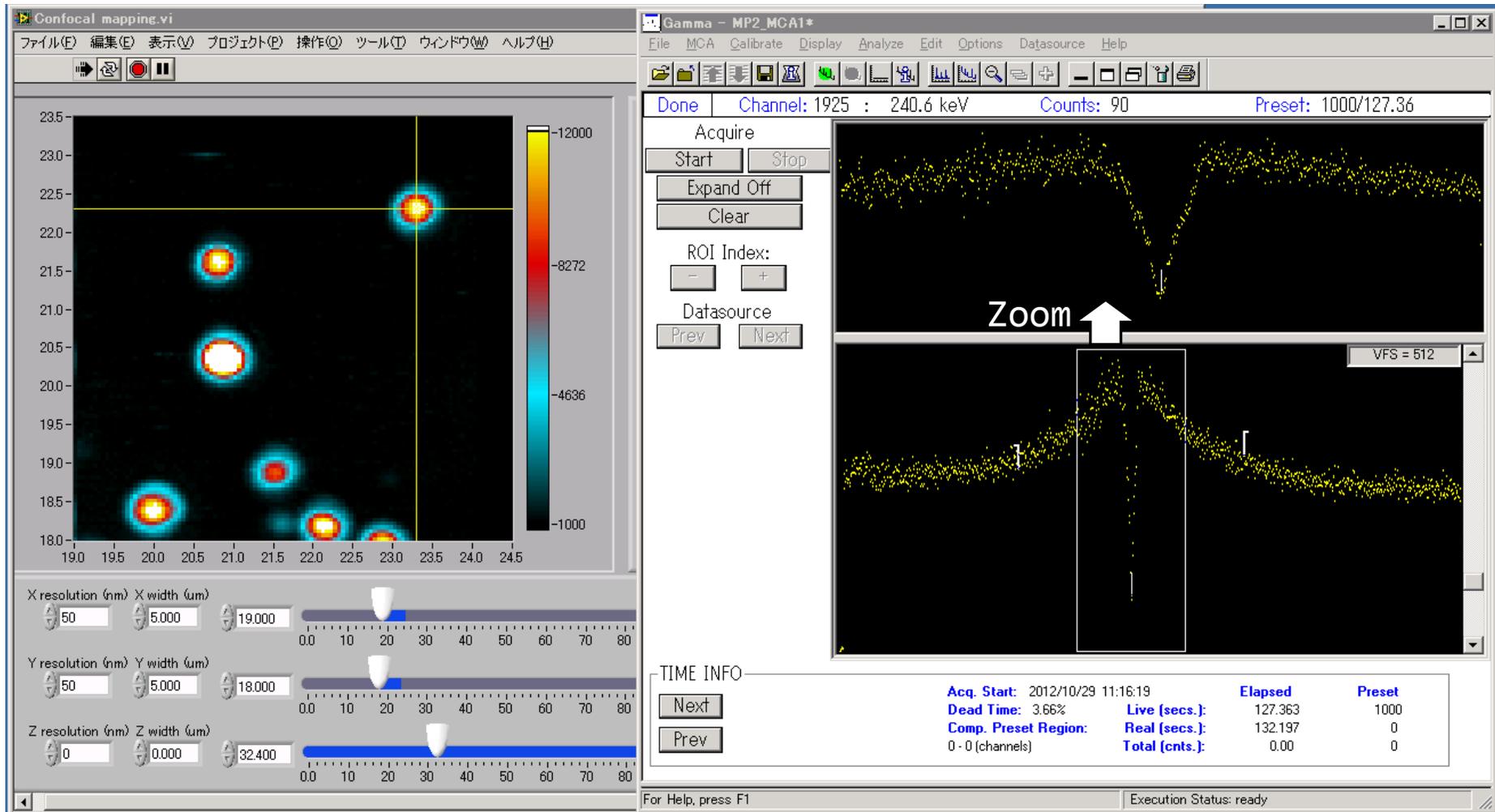
+

MCA (more than 100,000 c/s)



Anti-Bunching

5x5um scan with 50 nm resolution



おわりに

- 半導体を取り巻く放射線環境と三つの放射線影響
- TIBICの開発&評価例
- TIBICの新型; 単一イオン誘起発光を利用したIPEM
 - 何か良い発光体をご存知ないですか?
 - XYの高速読み出しってどうしたら良いですか?
- TIBICの活用; ダイヤモンド中のNV中心
 - たった1個のNVを作る・観測する
 - Anti-bunching: ノイズを低減する良い方法を教えてください
 - (未着手) コヒーレンス時間を測定するためのDAQをどうするか?