

半導体量子デバイスの放射線応答調査のための デバイス放射化と定量分析

大阪大学大学院理学研究科 吉田齊

共同研究者;

東北大学ニュートリノ科学研究センター 岸本康宏

- 共同利用研究経費: 旅費9.8万円 研究費2.2万円
 - 旅費に使用; 阪大 — 神岡間

研究目的

● 研究課題

「半導体量子ドデバイスの放射線応答調査のためのデバイス放射化と定量分析」

● 研究目的の概要

- 半導体量子ドット(半導体QD)の放射線応答の調査を行う
- 半導体QDへ電離放射線を照射し、放射線に対する応答・耐性の評価
 - 放射線耐性が強い場合 → 将来の量子コンピュータ開発に向けて、半導体QDデバイスが強力な候補になることを示せる
 - 放射線に対して強い応答がある場合 → エラー抑制のために対策が必要 & 半導体QDを放射線を検出するためのセンサーとして利用することを検討

放射性核種生成量の調査

● 半導体QDデバイス → デバイスとしての素子が小さい

- 集積化に有利
- 環境放射線への曝露、内部放射性不純物量を絶対的に抑制できる

電離放射線による影響(放射線エラー)への耐性が強いと期待 ← 調査

半導体量子ドット

● 半導体量子ドット(QD)

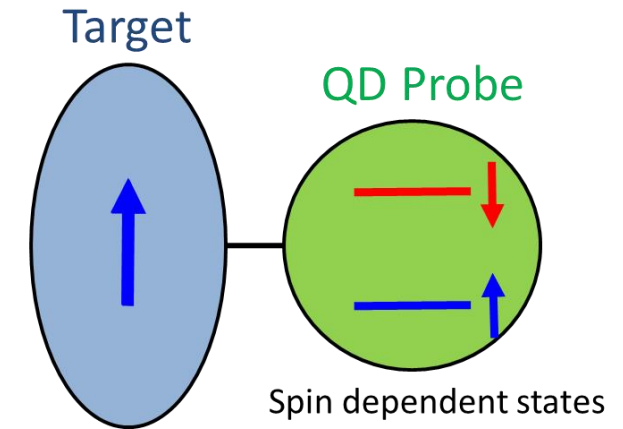
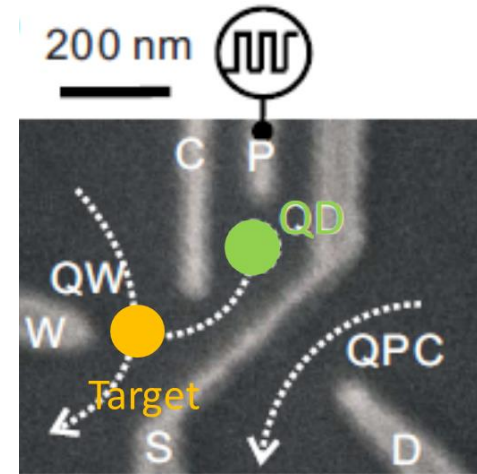
- 半導体に電子を閉じ込めたもの
- 量子状態を電圧で制御できる
- 良いエネルギー分解能($\sim 10\mu\text{eV}$)
- 局所的なスピン状態にアクセス

● スピン量子ビット

- 半導体QDを量子ビットとして利用
- 長いコヒーレンス時間
- 初期化, 読み出し
- スピン状態操作
- 大規模化

研究が進んでいる

量子情報処理に向けた
スピン量子ビット



- 環境放射線によるデコヒーレンス (量子計算へ影響)
→ 放射線に対する応答の調査が必要
 - $\sim 10\text{mK}$ で動作
 - 冷却に時間がかかる(3~4日)

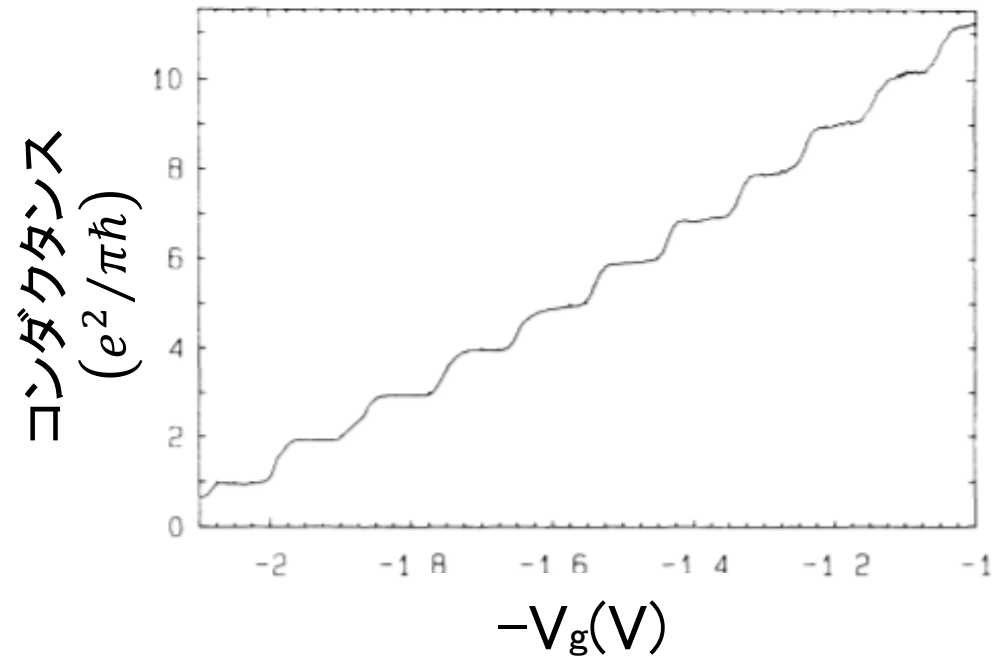
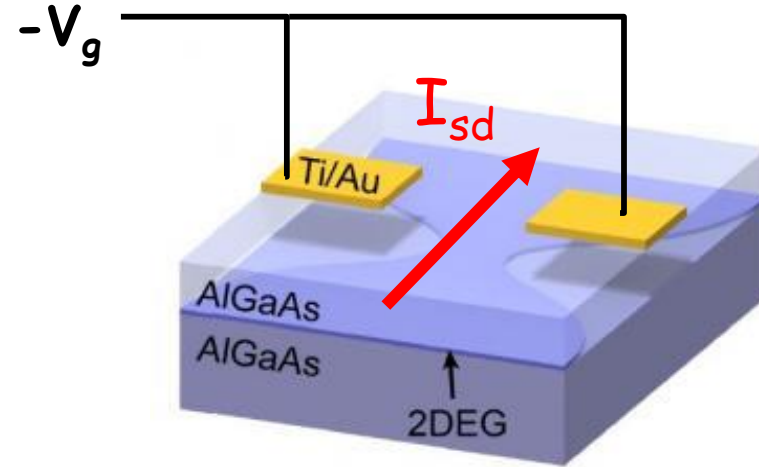
前段階としてQPCの放射線応答を調査

量子ポイントコンタクト(QPC)

- 二次元電子ガスにゲート電圧 $-V_g$
→ コンダクタンスが量子化する現象
 - 周辺の電荷分布に鋭敏に反応する
 - 量子ドットの電子の検出に使用
 - **~4Kで動作**
- ミクロなスケールで放射線を検出できる？
 - 素子が非常に小さい(~100nm)
 - 放射線を直接当てるのは難しい

液化He(将来は希釈冷凍機)が必要

放射線の使用に制限がある



研究手法

● 電離放射線の照射方法

- 半導体デバイスに中性子を照射し、生成放射性核種の崩壊を利用
- 基盤材料:ガリウムヒ素(GaAs)
- GaAs基材の熱中性子捕獲による生成核種

放射化

元素	同位体	天然存在比	反応	中性子捕獲 断面積	放射能	半減期	Q値
Ga	^{69}Ga	60.2%	$^{69}\text{Ga}(n,\gamma)^{70}\text{Ga}$	1.9 b	^{70}Ga	β^- : 21.1m	1.66MeV
	^{71}Ga	39.8%	$^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$	5.0 b	^{72}Ga	β^- : 14.1h	3.99MeV
As	^{75}As	100%	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$	4.5 b	^{76}As	β^- : 26.3h	2.97MeV

● 放射線応答

- 電離放射線量が崩壊によって時間的に減衰
- 半導体QDを利用した量子ビット状態の緩和時間の時間変化を測定することで、環境放射線の影響を加速的に評価

調査: 法定外中性子線源でどの程度の放射性核種が生成されるのか?

調査の方法

● GaAs基盤材料の放射化

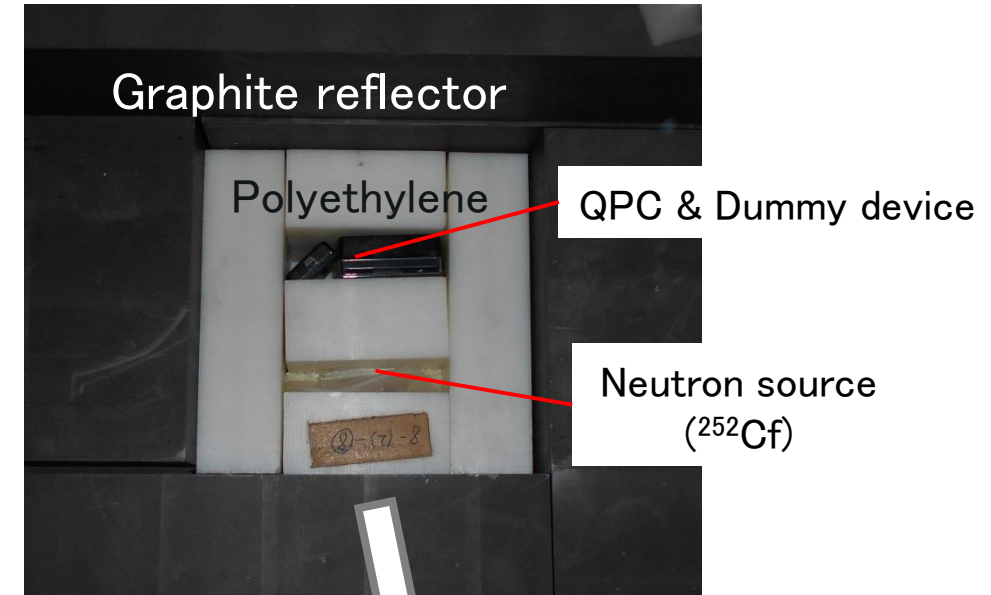
- GaAs基盤が高価(材料が少量)
- 中性子線源(法定外線源)を使用
 - 法律上の放射化物にならないよう配慮
 - 放射化量は少ない
- 神岡地下実験室にてGe検出器で
 ^{72}Ga , ^{76}As 生成量を評価
- 半減期(~1日)であるため、神岡にて中性子照射

● 中性子線源(神岡-51)を使用

- 金庫内にGaAs基材を10日間程度保管 (SK純水エリア)
- → Ge検出器(実験室D)にて生成核種、生成量測定

神岡-51 設計名称：中性子線源 N-252 CE
 認証番号：Ⓢ104

Nuclide	Source No.	Activity	Radiation Output	Reference Date
Cf-252	P3-496	100 μCi (3.7 MBq)	4.12 E+05 n/s	2017-02-15



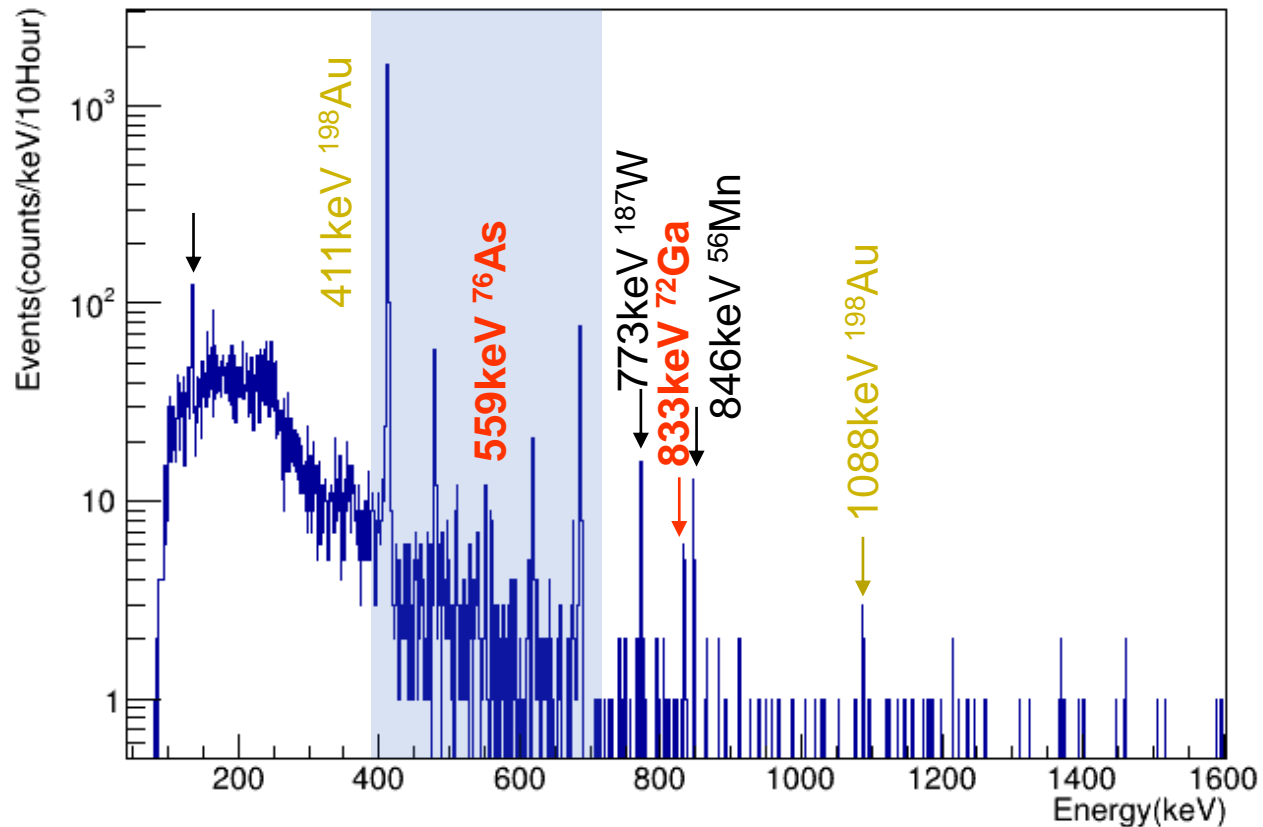
Ge検出器での測定

- 実験室D後室のHPGe検出器で γ 線測定

阪大RCNP 共同利用課題として実施

- 測定結果

- サンプル:ダミーデバイス
- 測定時間:10時間



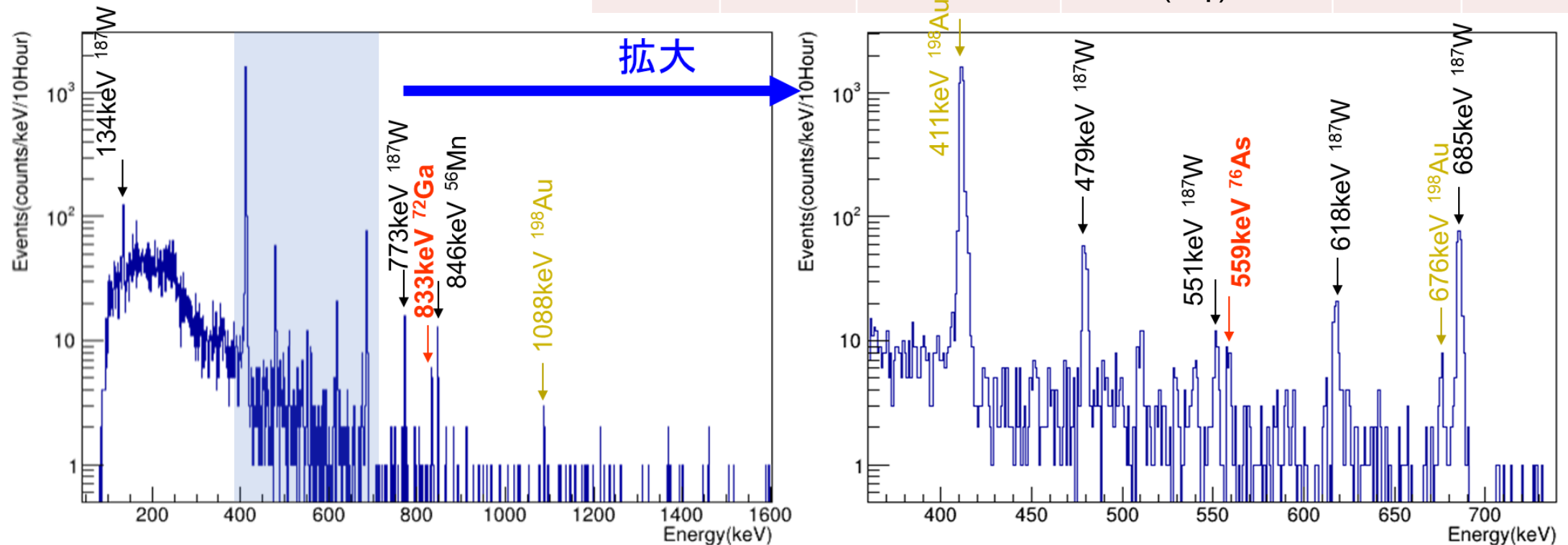
放射化量分析 (HPGe測定)

測定結果

- サンプル:ダミーデバイス
- 測定時間:10時間

同位体	天然存在比	中性子捕獲断面積	反応	放射能	半減期
^{71}Ga	39.8%	5.0 b	$^{71}\text{Ga}(n,\gamma)^{72}\text{Ga}$	^{72}Ga	14.10h
^{75}As	100%	4.5 b	$^{75}\text{As}(n,\gamma)^{76}\text{As}$	^{76}As	26.24h
^{197}Au	100%	98.65b	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	^{198}Au	64.66h
^{186}W	28.4%	38.1b	$^{186}\text{W}(n,\gamma)^{187}\text{W}$	^{187}W	23.72h

観測されたエネルギースペクトル



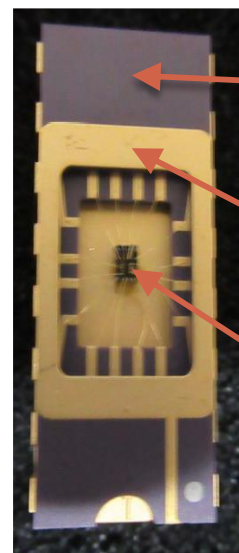
Ge検出器で測定(放射化量)

● 測定デバイス

- Au: 導体部メッキ
- W: 金メッキとGaAs基盤のペースト

● 放射化量

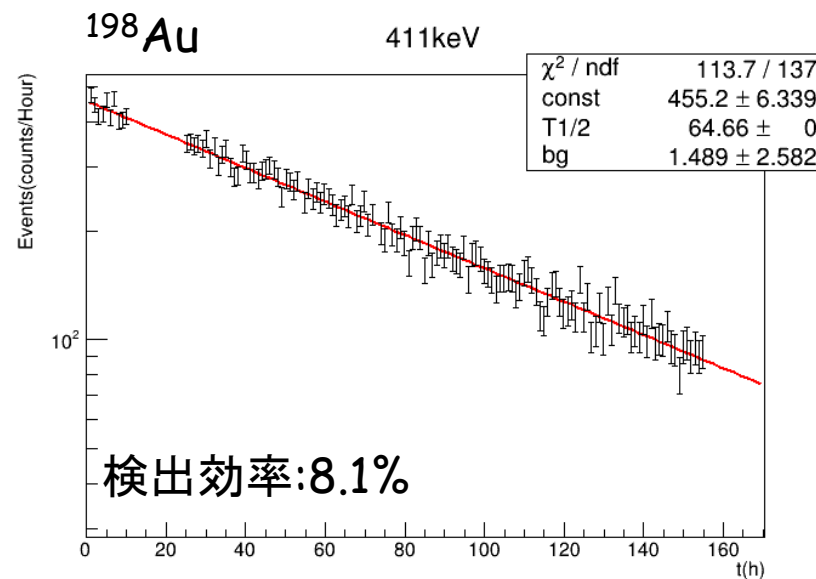
- GaAsは、mBq程度



チップキャリア
基盤 セラミック(Al_2O_3)
サイズ 8mm x 20mm
厚さ 2.1 mm

導体部 W(Auめっき)
デバイス部 GaAs基盤
サイズ 1 mm x 1.5 mm
厚さ 0.63 μm

Nuclide	Activity(Bq)	Half life
^{72}Ga	$(1.3 \pm 0.29) \times 10^{-2}$	14.10 h
^{76}As	$(2.6 \pm 0.52) \times 10^{-2}$	26.24 h
^{198}Au	1.64 ± 0.062	64.66 h
^{187}W	$(3.7 \pm 0.27) \times 10^{-1}$	23.72 h



まとめ

- 半導体量子デバイスの放射線応答調査のためのデバイス放射化と定量分析
 - 半導体デバイスに中性子を照射し、生成放射性核種の崩壊を利用
 - 基盤材料:ガリウムヒ素(GaAs)
- 放射線応答の調査のため
 - 電離放射線量が崩壊によって時間的に減衰
 - 半導体QDを利用した量子ビット状態の緩和時間の時間変化を測定することで、環境放射線の影響を加速的に評価
- 今後
 - 中性子照射量と放射能生成量の関係は評価完了(今年度で終了)
 - 東北大学にて照射用遮蔽と中性子線源を整備(科研費) □ 直ちに測定が可能
 - α 線源(^{241}Am)を使用した照射と比較しながら研究を進める
- 共同利用研究経費:旅費9.8万円 研究費2.2万円
 - 旅費に使用; 阪大 - 神岡間