

令和2～4年度 原子力システム研究開発事業
「ボトルネック課題解決型」
成果報告会

過酷事故対応電子機器の実用化に向けた 耐放射線・高温動作半導体デバイスの高性能化

研究代表者: 梅沢 仁

参画機関:

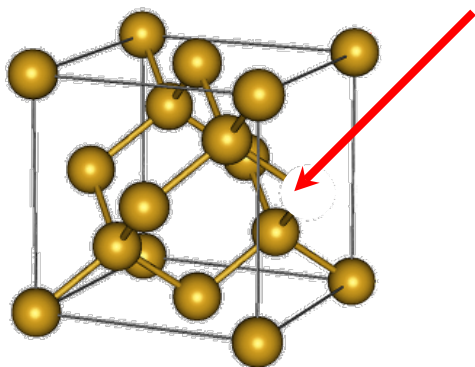
産業技術総合研究所 北海道大学 福島工業高等専門学校



トータルドーズ効果 TID (Total Ionizing Dose Effect)

放射線による半導体の損傷による半永久的な性能劣化

- ・半導体内部に固定電荷や界面準位を形成
- ・結晶構成元素の変位損傷



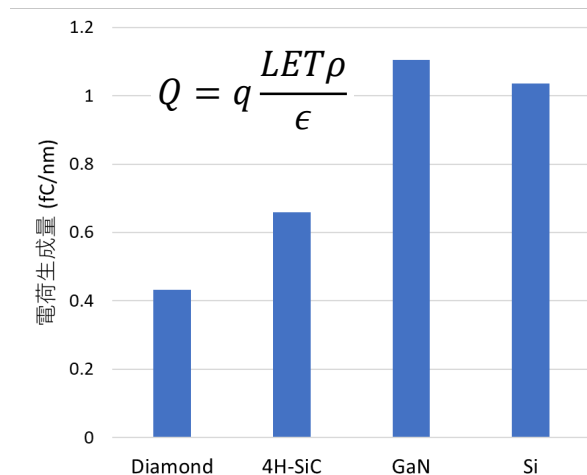
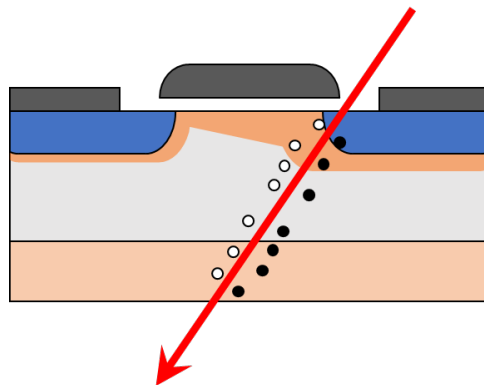
ダイヤモンドがTIDで優れている理由

1. はじきだしに必要なエネルギーが大きい ($E_{d, Si} = 20\text{eV}$, $E_{d, diam.} = 35\text{-}45\text{eV}$)
2. 反跳原子や核分裂片が軽い

シングルイベント効果 SEE (Single Event Effect)

放射線の電離作用による影響

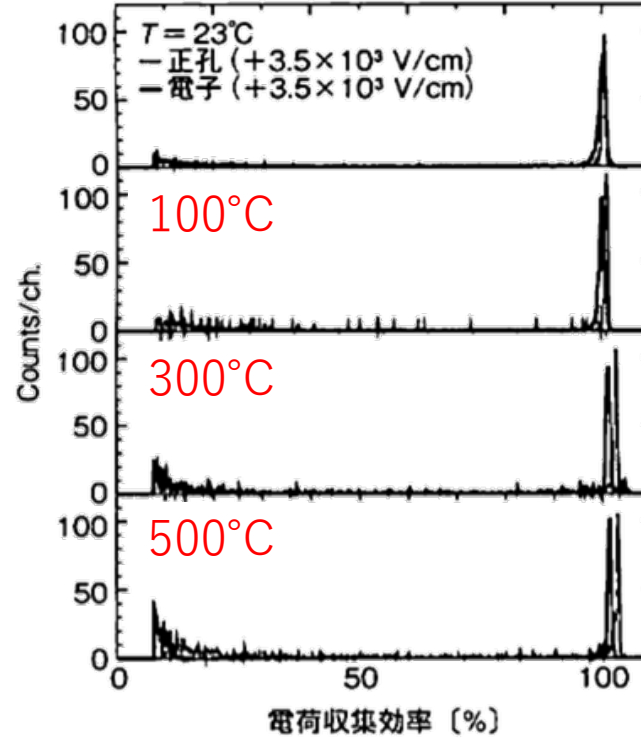
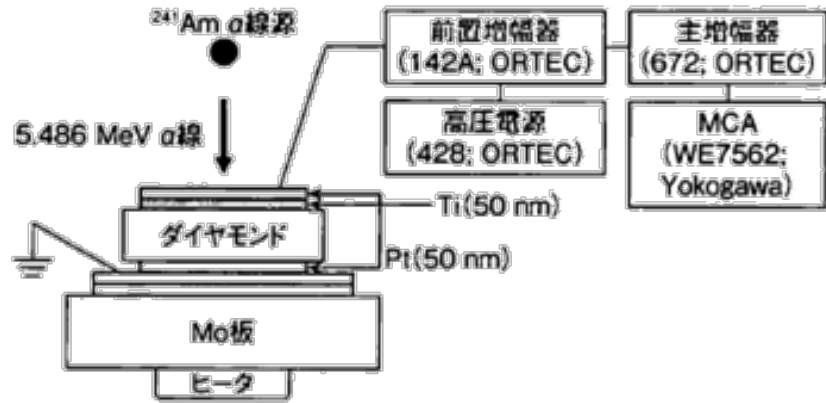
- ・半導体内部に高密度の自由電子・正孔が生成
- ・半導体素子に電流が流れることによる一時的な故障



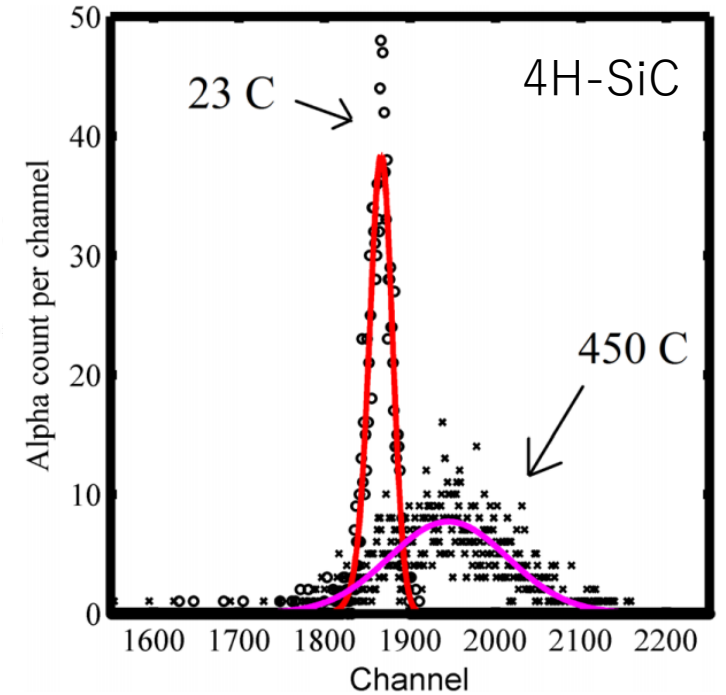
$$Q = q \frac{LET\rho}{\epsilon}$$

ダイヤモンドがSEEで優れている理由

1. 電子正孔対生成が少ない ($\epsilon = 13.1\text{eV}$)
2. 閾値が深い ($E_g = 5.5\text{eV}$)



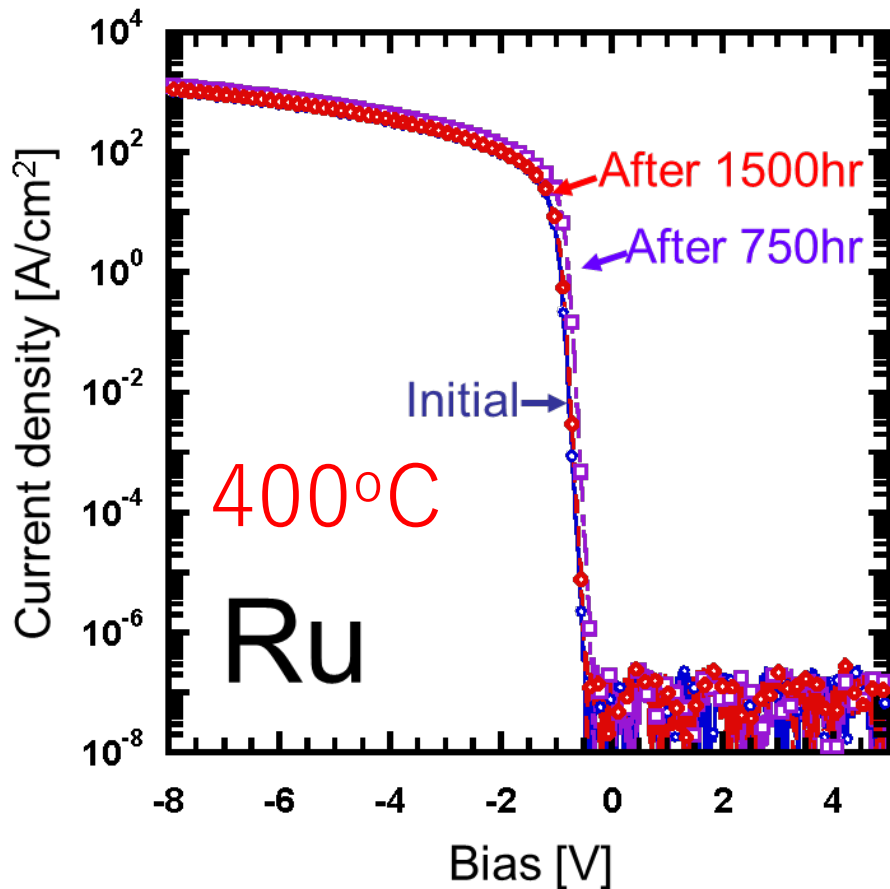
北大製超高品質単結晶ダイヤモンド



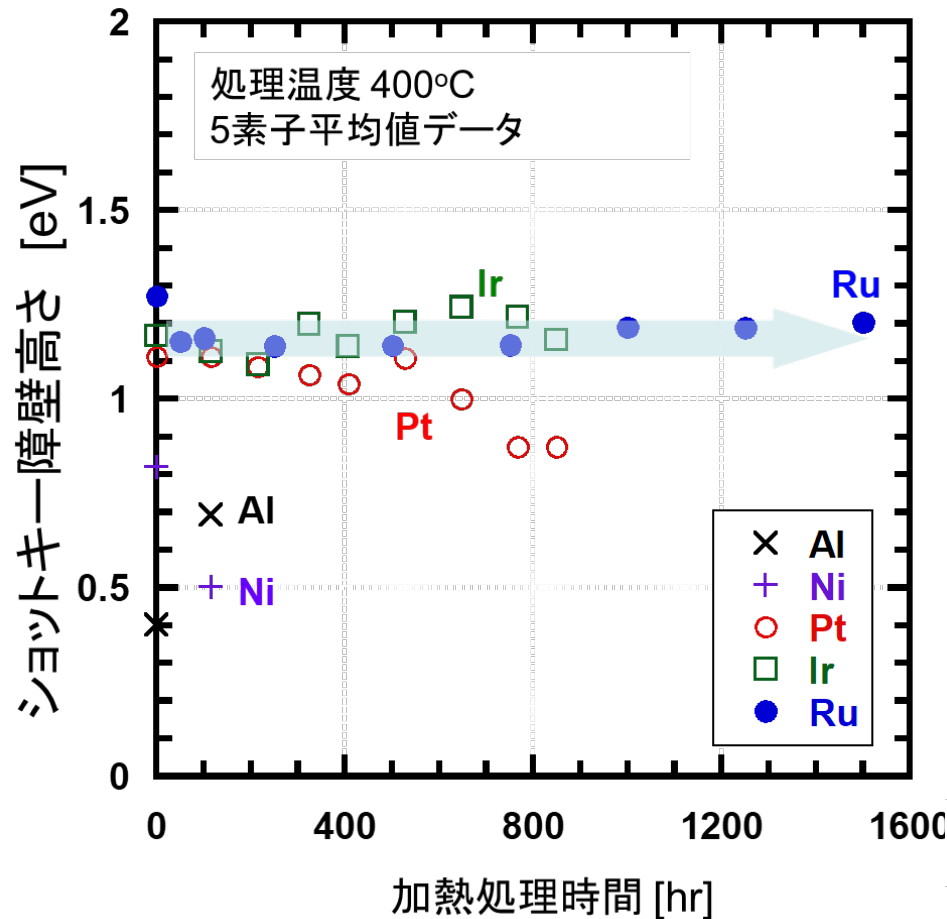
300°C以上でエネルギー分解能劣化
Garcia et al., APL 103, 152108 (2013).

➤ 500°Cまで良好なエネルギー分解能、収集効率を維持

坪田雅功, 金子純一, NEWDIAMOND 130, 36 (2018)



高温放置試験



Al, Ni

金属⇔ダイヤモンド界面
 反応生成物が形成
 ⇒高温で性能劣化・特性変動

Pt, Ir, Ru

金属⇔ダイヤモンド界面
 反応しない
 ⇒高温で長期信頼性確保

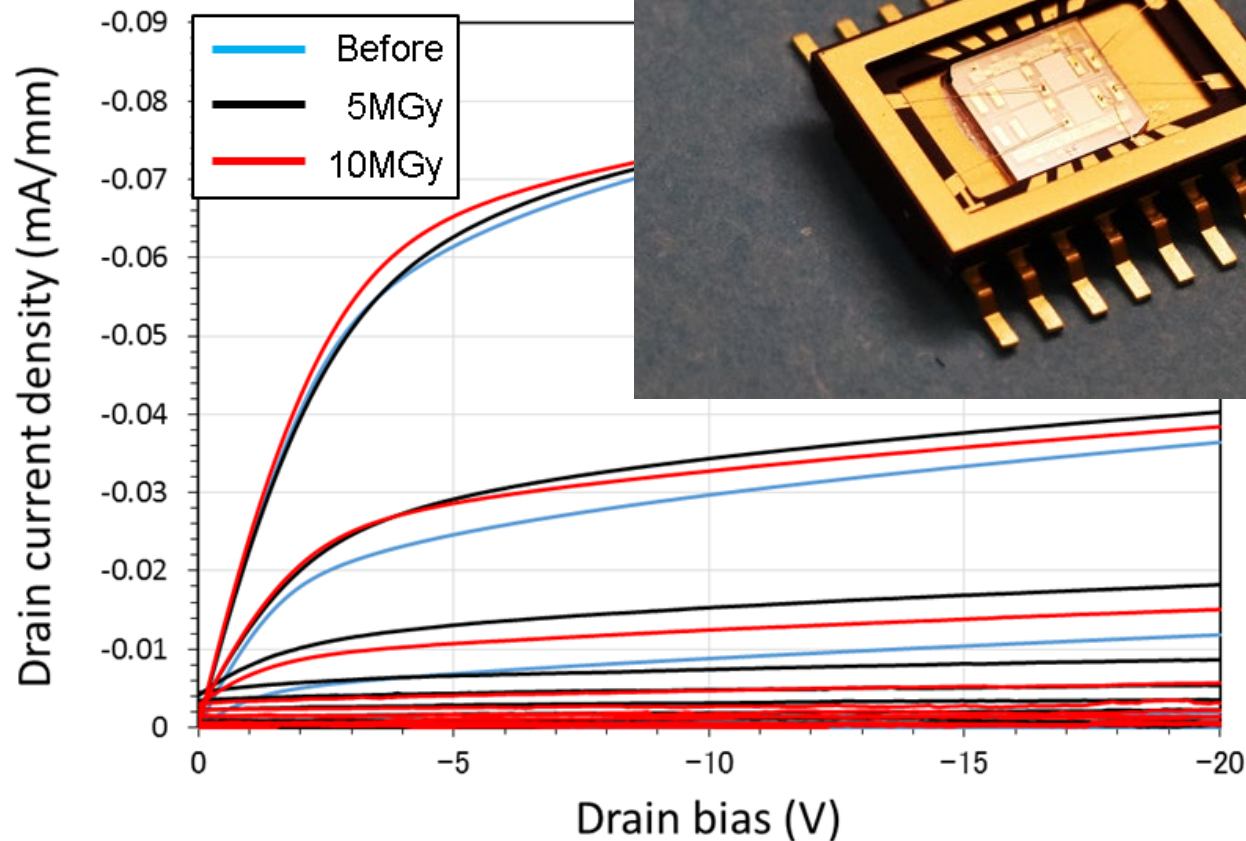
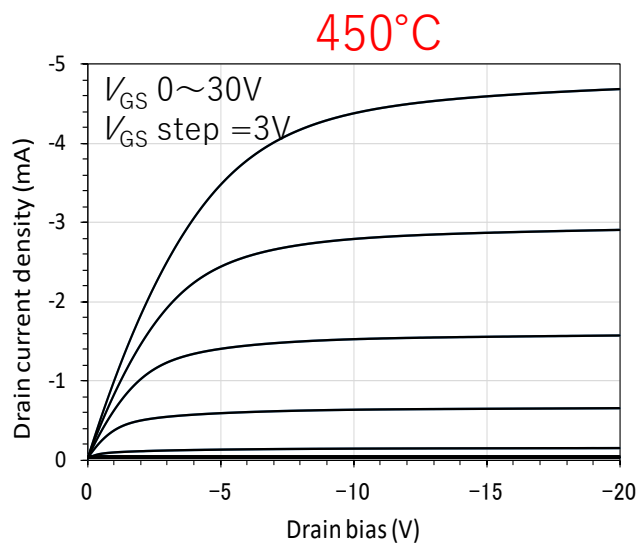
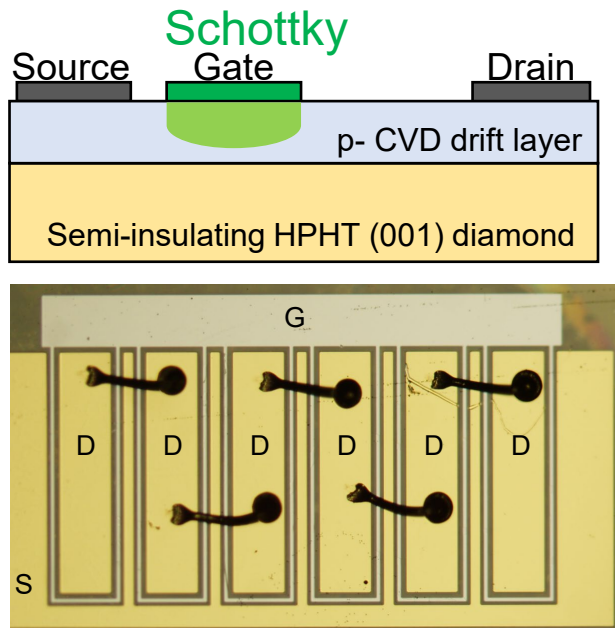
250°C換算の寿命
 30万時間

高温で動作可能

K. Ikeda et al., Appl. Phys. Express, 2 (2009) 011202.

H. Umezawa et al., Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 05fp06.

高温動作・耐放射線ダイヤモンドMESFET



原子カシステム研究開発事業成果

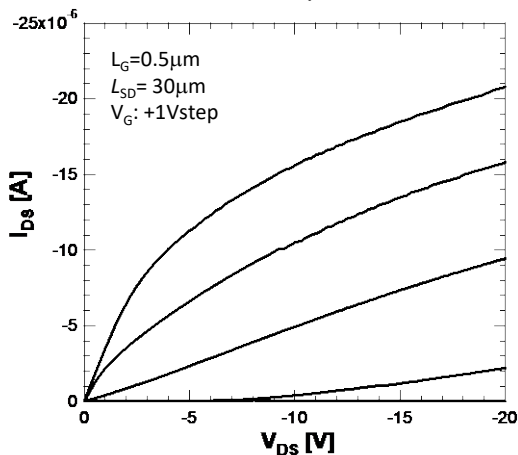
研究項目① バルク伝導型ダイヤモンドFETの高利得化と準量産技術開発



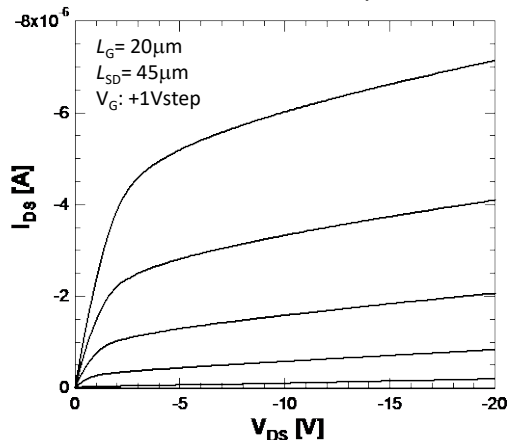
微細ゲートプロセス開発

ゲート幅 $1\mu\text{m}$ 以下の微細ゲート長の
ダイヤモンドMEFSETでの動作を確認.

◆ ゲート長 $0.5\mu\text{m}$

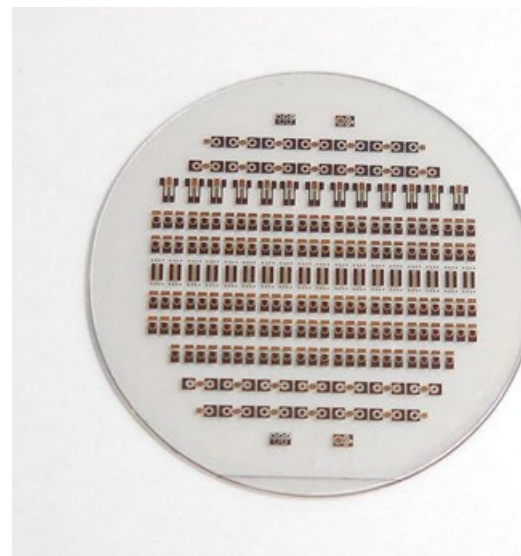


(参考) ゲート長 $20\mu\text{m}$

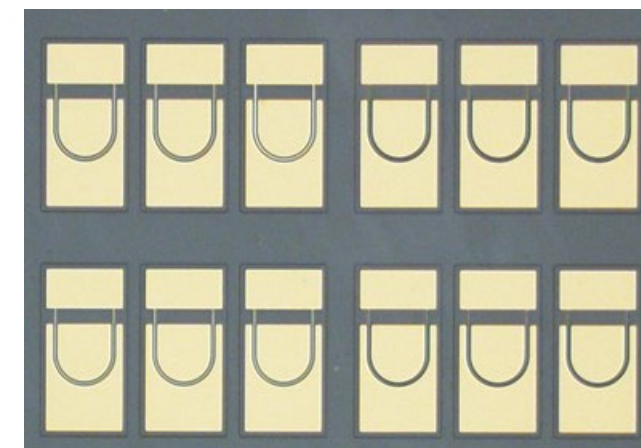


準量産技術開発(プロセス技術)

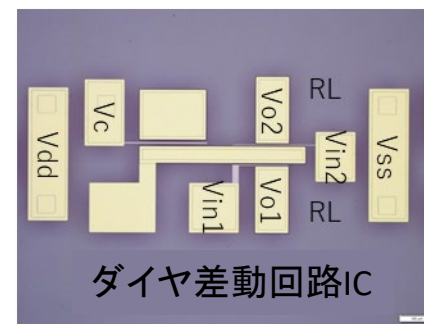
ハーフィンチウェハ用プロセスを開発
高歩留化でウェハあたりの素子数を稼ぐことに成功



第5世代MESFET

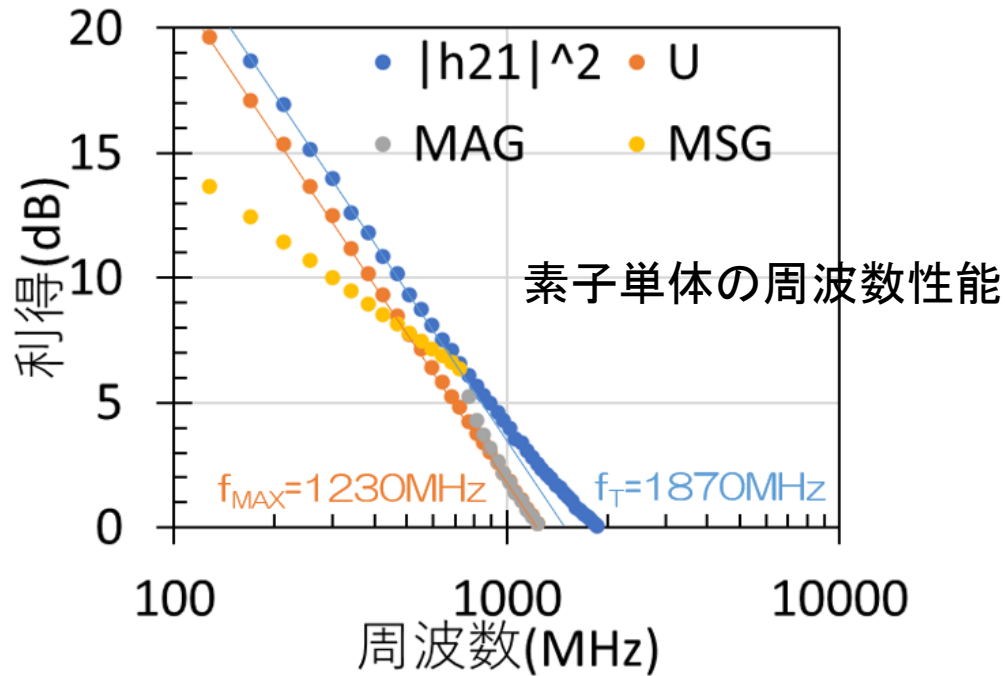
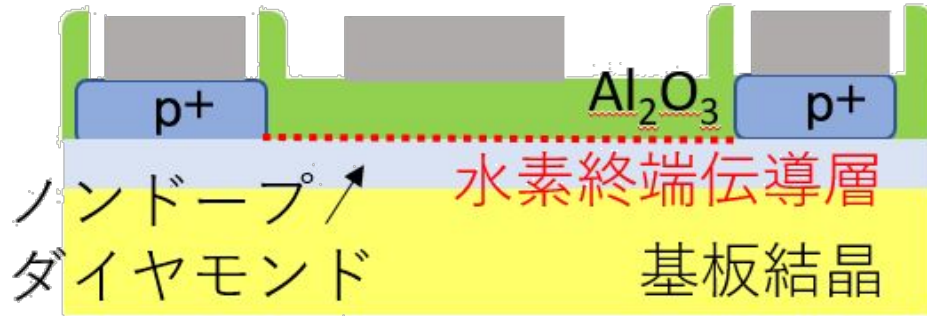


500 μm

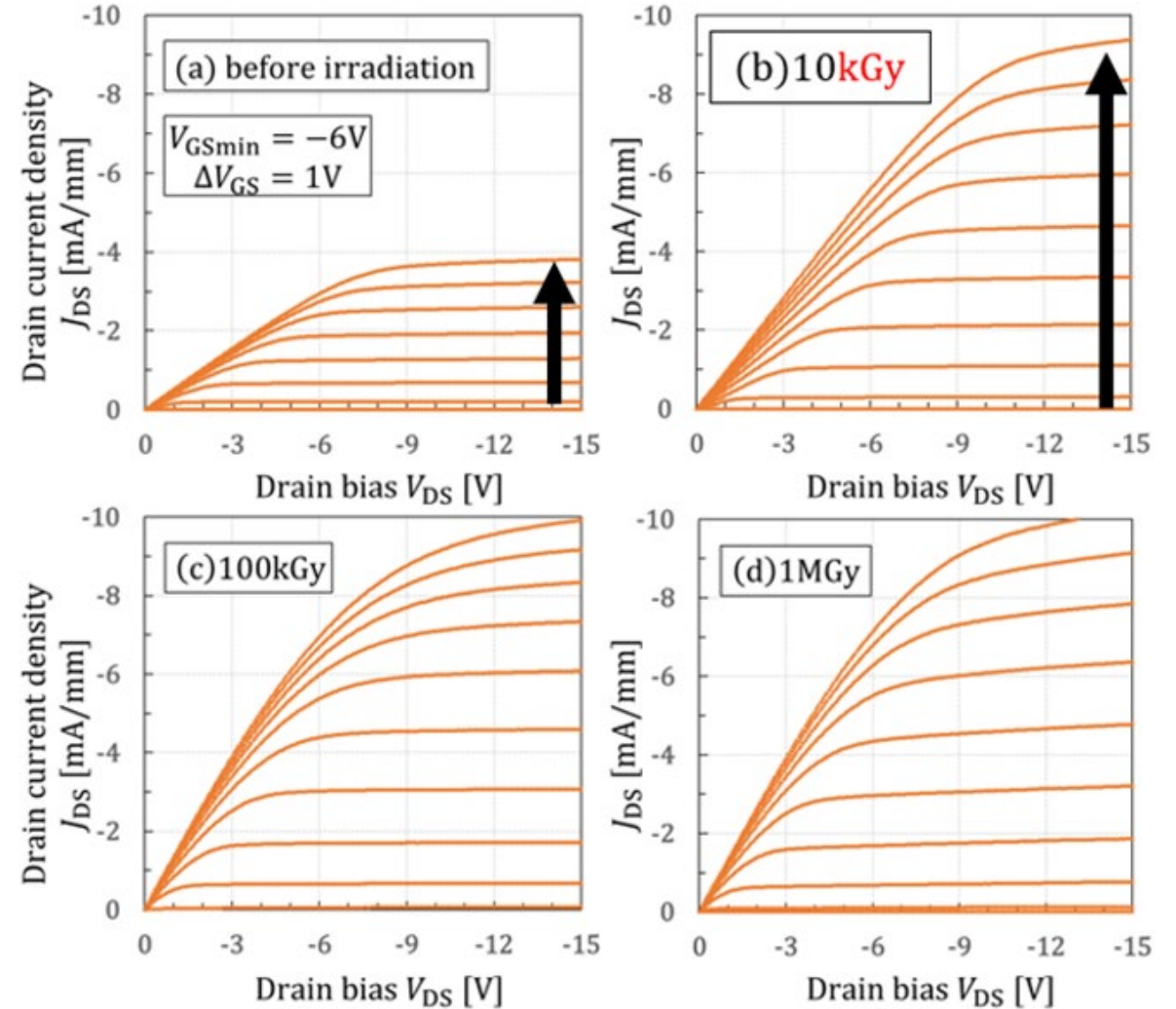


性能安定化を目指してIC化に着手

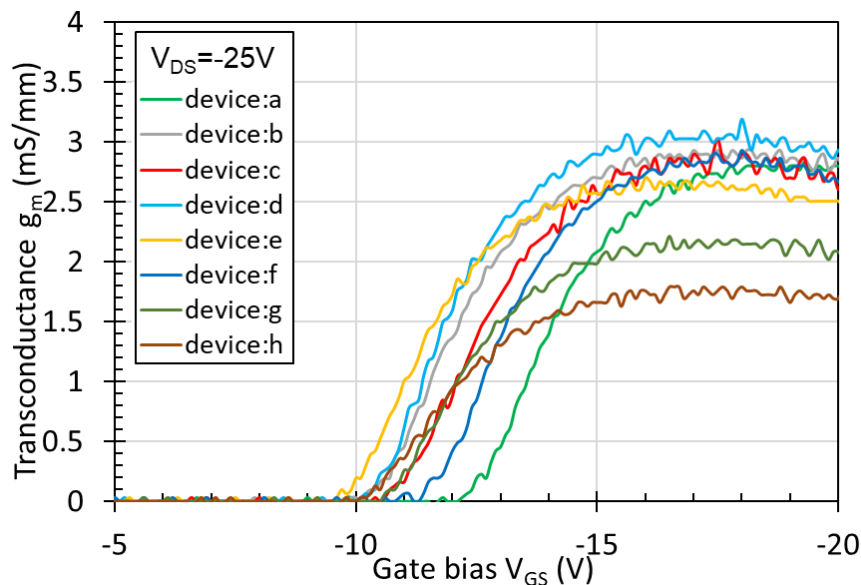
ソース電極 ゲート電極 ドレイン電極



放射線照射による特性の変化



研究項目②表面伝導型ダイヤモンドFETの開発



g_{m1} ; 相互コンダクタンス ($FET1$)

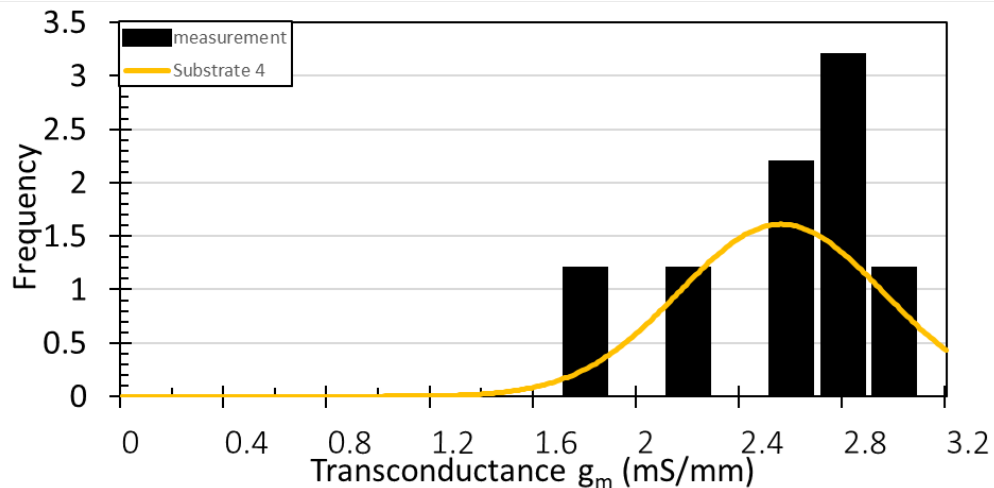
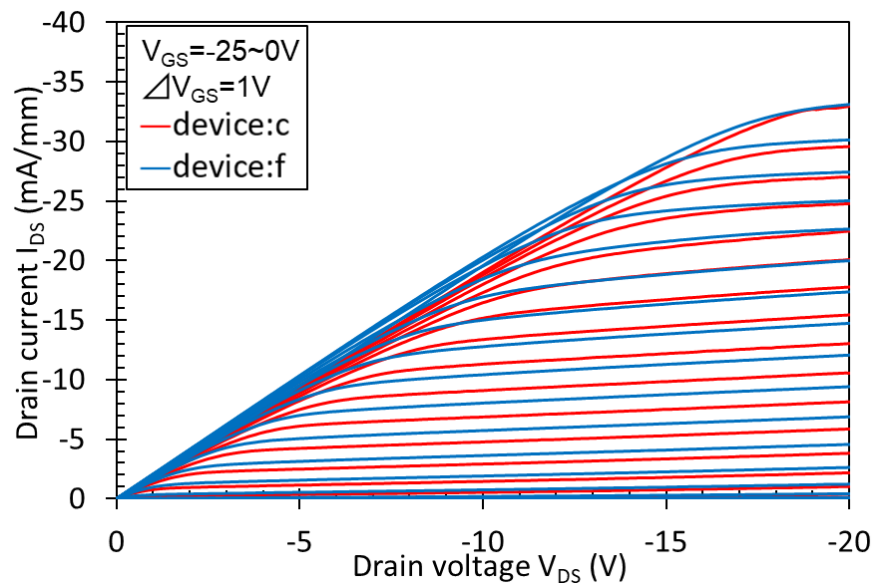
g_{m2} ; 相互コンダクタンス ($FET2$)

$$\Delta g_m = |g_{m1} - g_{m2}|$$

$$\text{差動ゲイン} = 20 \log_{10} \left(\frac{2R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}}} \right) \quad \text{同相ゲイン} = 20 \log_{10} \left(\frac{\Delta g_m R_D}{(g_{m1} + g_{m2}) R_{SS} + 1} \right)$$

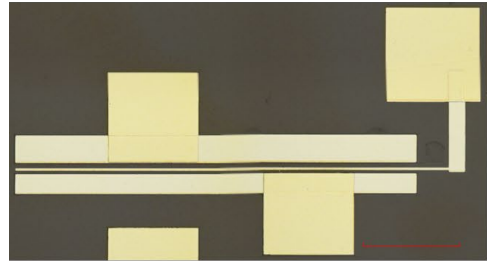
同窓信号除去比(CMRR) = (差動ゲイン) - (同相ゲイン)

差動ゲイン: 20.5dB、同相ゲイン: -58.8dB・・・CMRR : 79.3dB

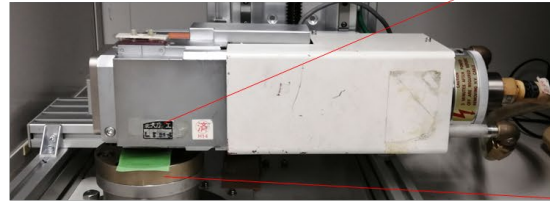


チップ間ばらつき 大きい
チップ内ばらつき 小さい

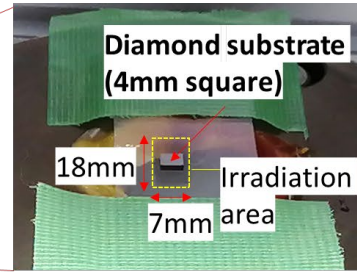
RADDFETの構成部品（電極・ダイヤモンド表面）における 対放射線性評価



RADDFET



X-ray tube target



Sample Location

RAADFET (Ru/Au)

Au:30nm
Ru:30nm
Electrode structure

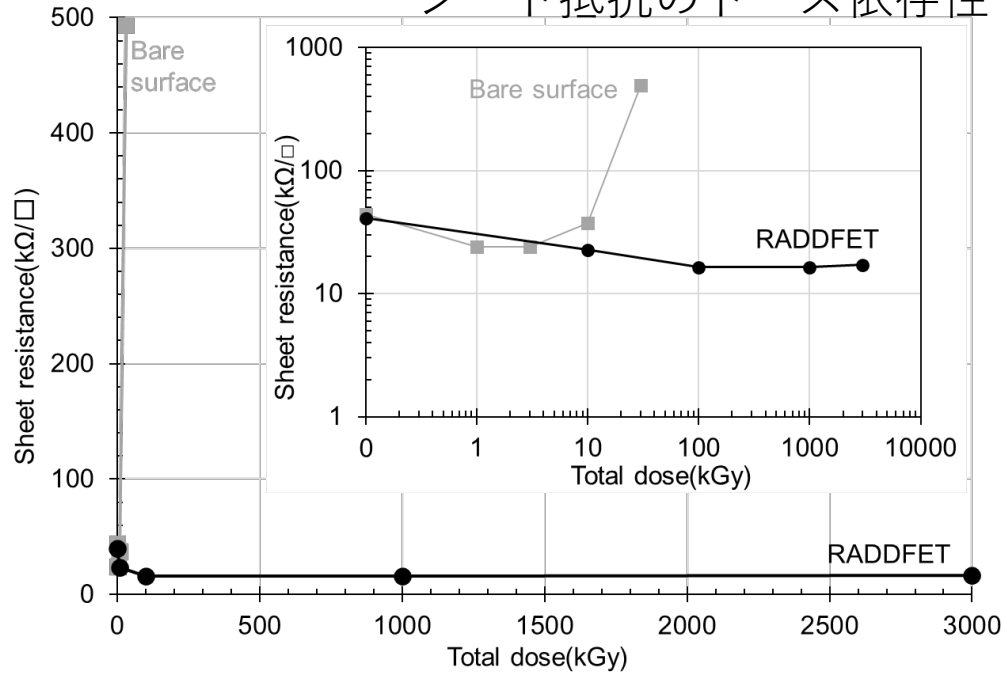
Au/Ru electrode Before irradiation → Au/Ru electrode After 3 MGy irradiation

Comparison (Au/Ni)

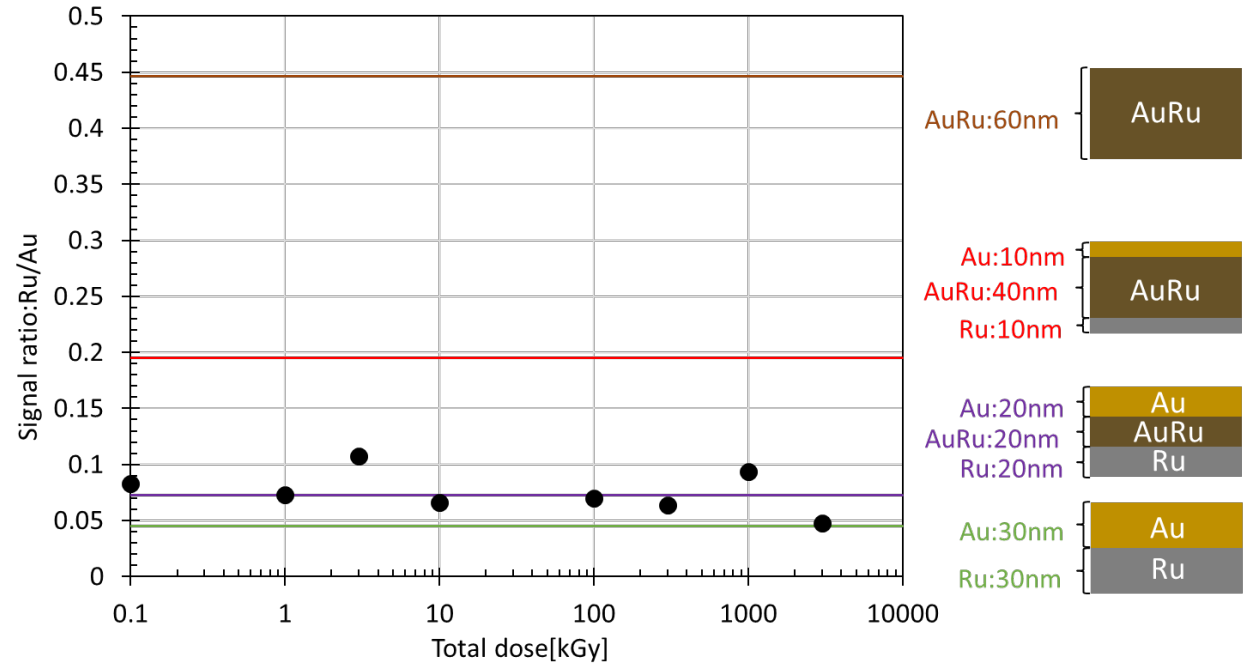
Au
Ni
Electrode structure

Au/Ni electrode Before irradiation [5] → Au/Ni electrode After 300 kGy irradiation [5]

シート抵抗のドーズ依存性



電極における相互拡散



研究項目④高温用電子部品の開発とX線照射試験(北大)

300°Cと500°Cでの動作を前提としたキャパシタ、抵抗等のディスクリット素子開発

	キャパシタ	抵抗
300°C	(Ba _{0.5} Sr _{0.5})TiO ₃ 、0.45BCT-0.55BMT	<ul style="list-style-type: none"> ○コンスタンタン等金属抵抗、特にCr等高融点金属の探索 ○オゾン対策技術 ○ダイヤモンド抵抗体の活用を検討
500°C	サファイア・アルミナ系が主 (AD法、ALD法による高容量化)	



試作ALD法アルミナコンデンサ



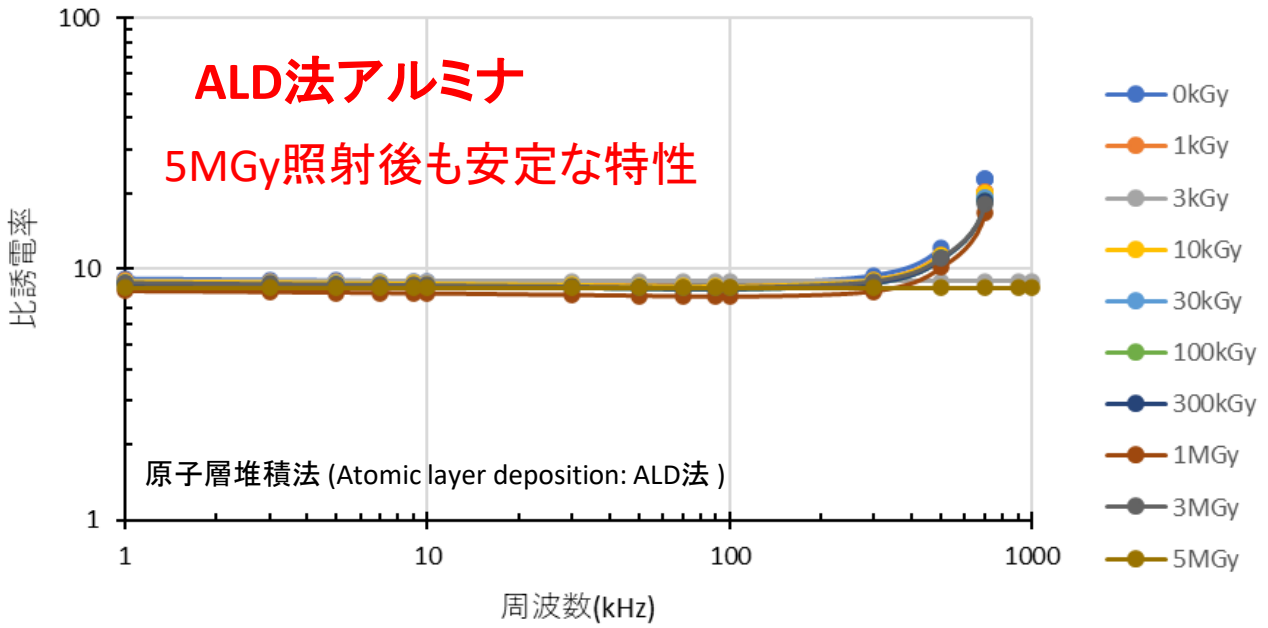
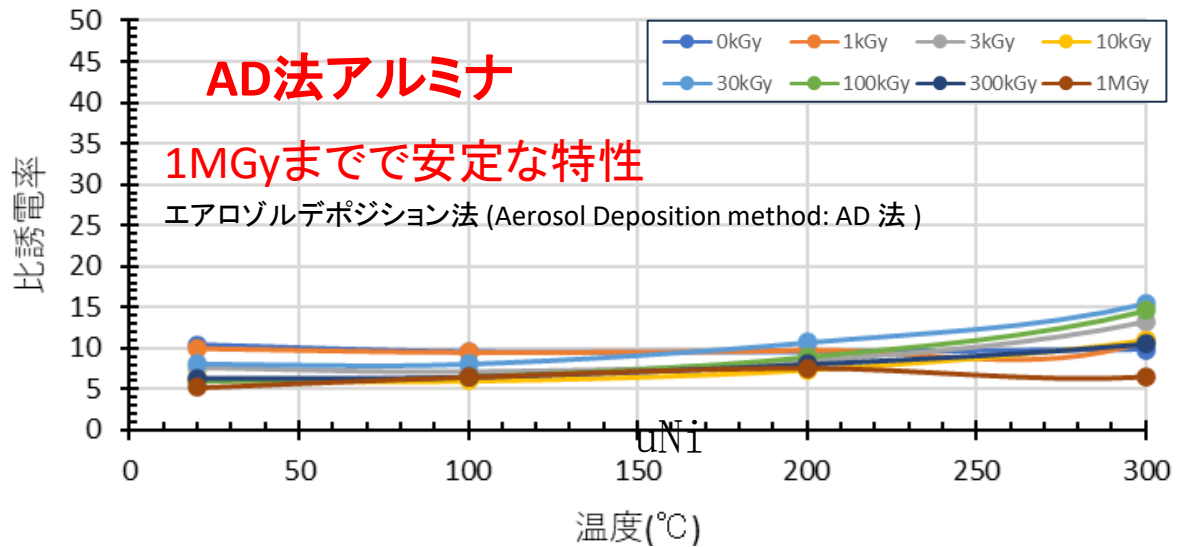
試作AD法アルミナコンデンサ



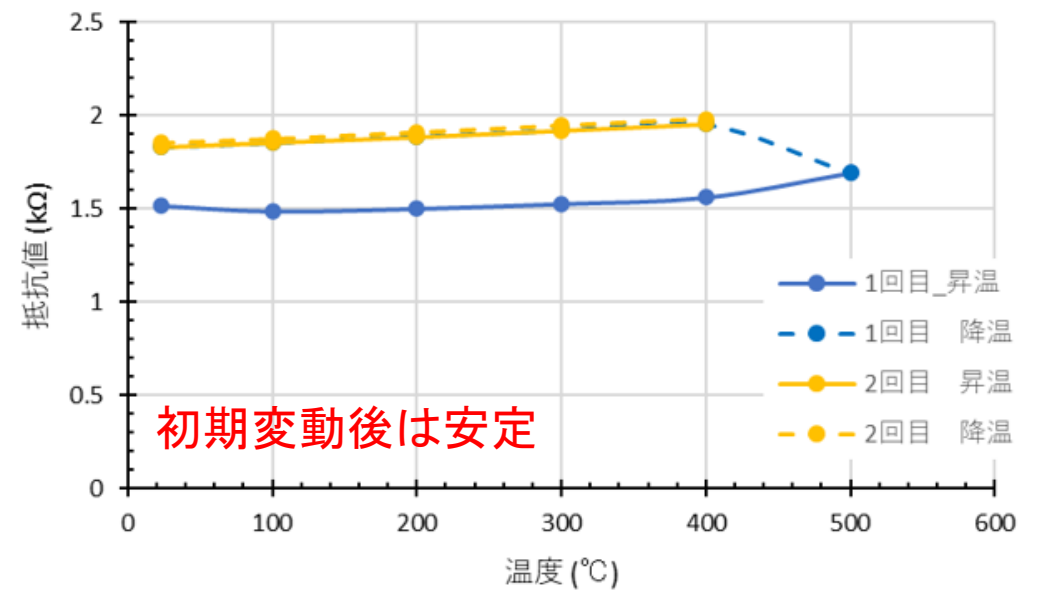
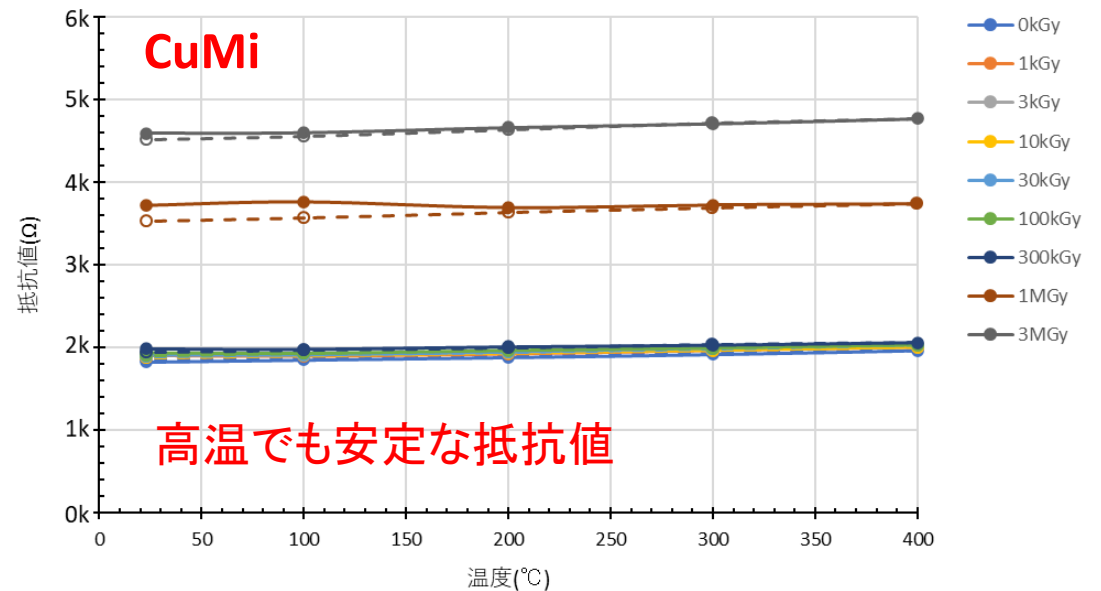
試作コンスタンタン抵抗素子

研究項目④高温用電子部品の開発とX線照射試験(北大)

コンデンサ



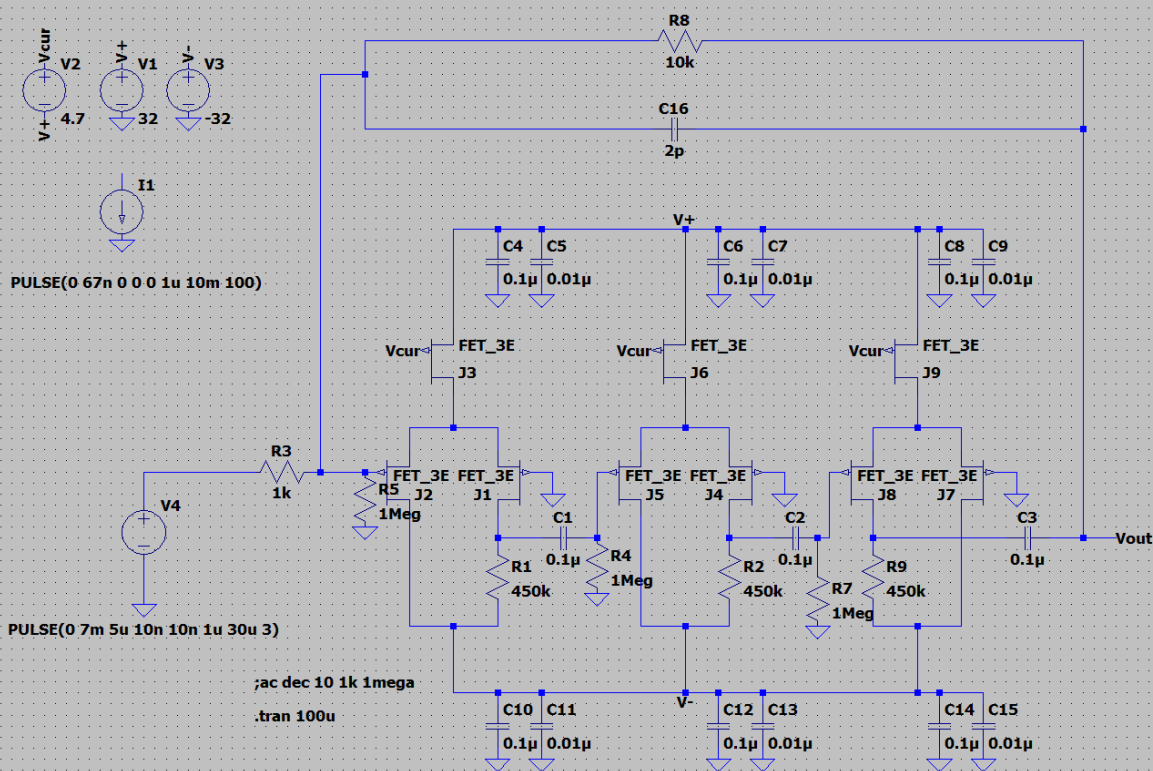
抵抗





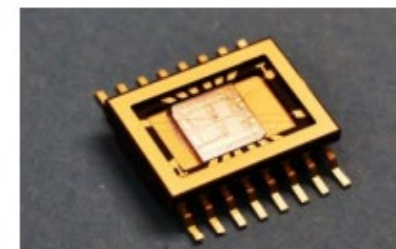
Sample of voltage inverting amp.

Gate terminals were grounded by 1M ohm, to keep bias point.



検出器回路設計専門家による設計サポート

素子試作・計測



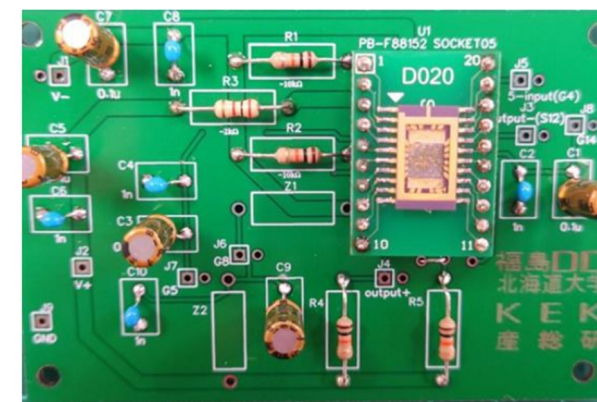
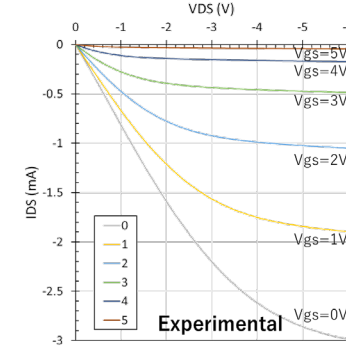
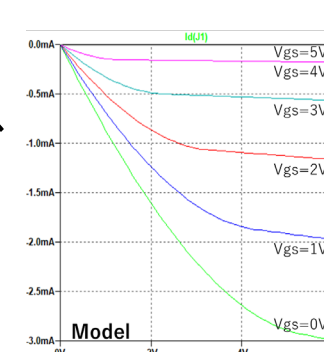
モデリング



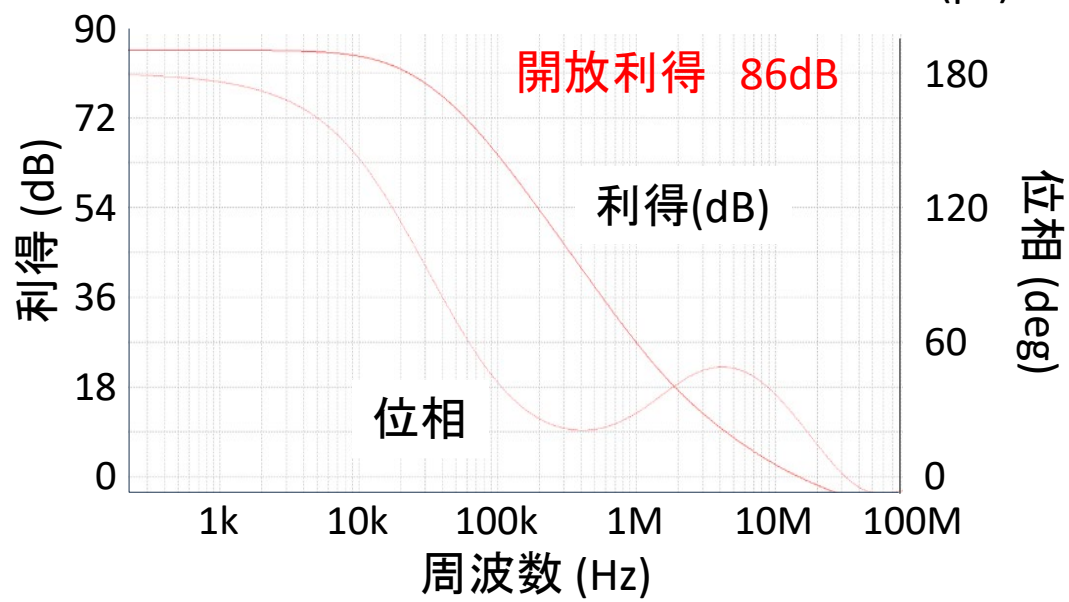
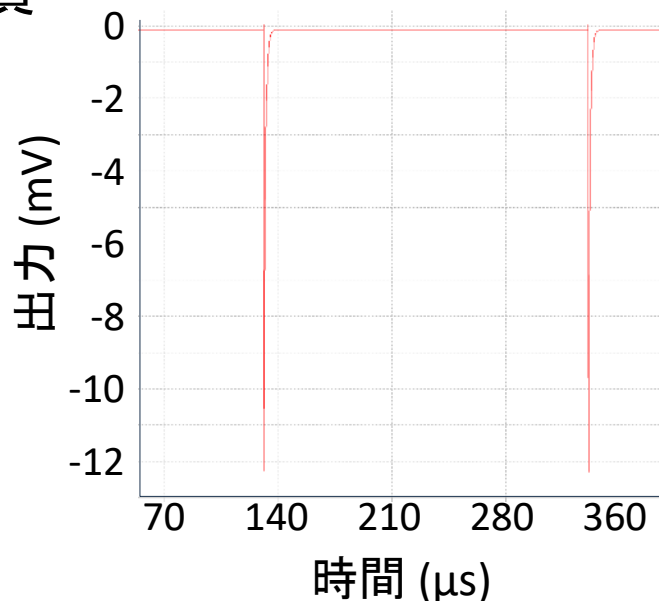
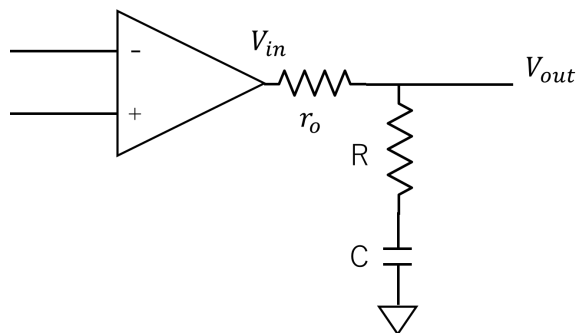
回路設計 (SPICE)



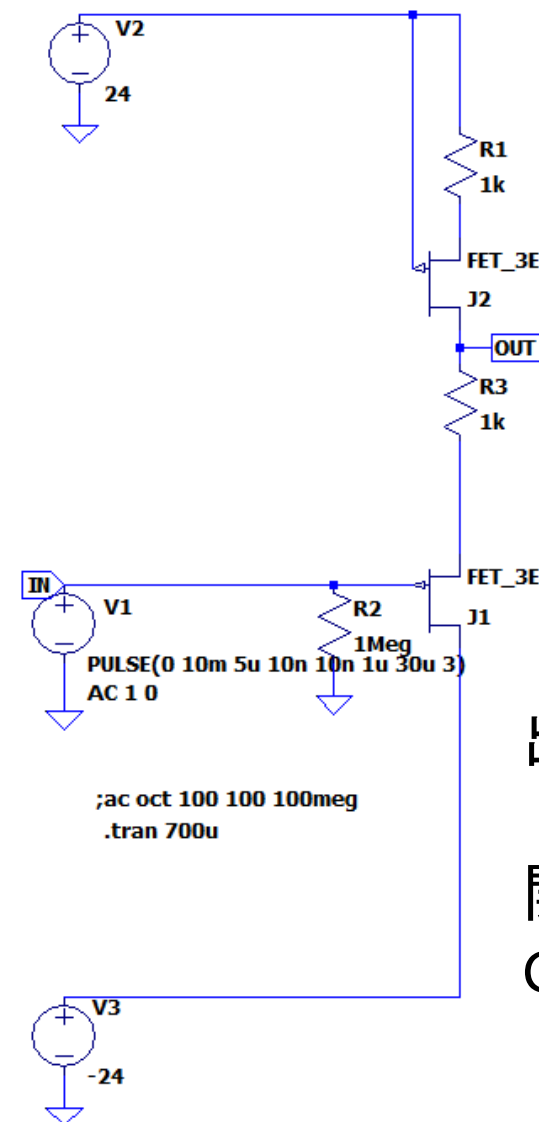
回路組立・評価



機能拡張(1) 位相補償



機能拡張(2) 低出力インピーダンス化



出力インピーダンス

開放利得 84dB
GB積 14MHz

2022年3月に起業

大熊ダイヤモンドデバイス社



**OOKUMA
DIAMOND
DEVICE**

原子力システム研究開発事業、CLADS英知事業の成果を社会実装するためのスタートアップ

臨界近接監視用ダイヤモンド中性子検出素子

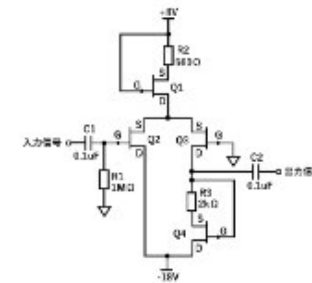
福島第一原発の廃炉作業に必須な中性子検出器の開発
ダイヤモンド検出器(超高純度ダイヤ)の製造方法確立
R4大熊町にテストラボ建設(大熊インキュベーションセンター内)



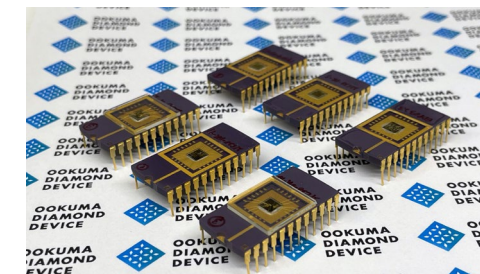
ダイヤ検出器搭載臨界監視モニター(CLADS英知)

耐環境ダイヤモンドデバイスおよび前置増幅器

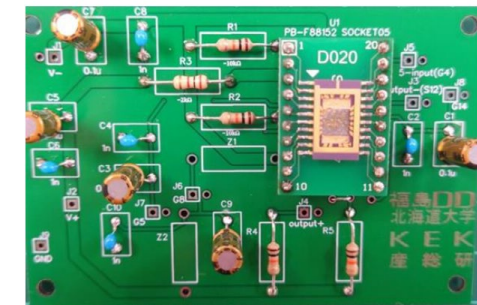
原子力発電所のメルトダウン事故でも生き延びるエレクトロニクスの開発
準量産に向けた工場仕様、プロセスの確定
耐熱・耐放射線素子/パッケージ/基板開発
R6に福島工場建設予定、R7から販売開始予定



ダイヤ素子搭載ユニットアンプ回路と動作テスト機



ダイヤディスクリートFET(8素子搭載型)



ダイヤFETテストアンプ