

## 水素センサ用 Si-MOSFET の硬 X 線高照射による劣化の評価 Analysis on Degradation of Hydrogen Gas Sensor Si-MOSFET for High Dose X-ray Irradiation Using Synchrotron Radiation of Hard X-ray

宇佐川 利幸, 南部 英, 米山 明男, 上田 和浩  
Toshiyuki Usagawa, Akira Nambu, Akio Yoneyama, Kazuhiro Ueda

(株)日立製作所 中央研究所  
Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

原発・宇宙応用などの水素濃度計には、高い放射線環境下での動作保証が求められる。通例の  $\gamma$  線照射実験では線量率が低すぎ、高ドーズ量(～5MGy)を照射するには一カ月近く要する。短時間で高ドーズ量を照射できる放射光 X 線を利用して、水素センサ用 Si-MOSFET の放射線劣化の実験を行った。低ドーズ量から高ドーズ量(～5MGy)の放射光 X 線を照射し、FET のドレインと P-Well 間 PN 接合の劣化は見られず、予想外に放射線耐性があることが判明した。

キーワード： Si-MOSFET、高ドーズ放射線劣化、水素センサ、放射光 X 線

### 背景と研究目的：

原発・宇宙応用の水素濃度計として、信頼性の高い水素センサ技術の開発が望まれている。シリコン技術の代表格であるマイコンや撮像デバイスは、それぞれ、100Gy, 10kGy 程度の放射線により、誤作動や劣化が起こることが知られており、Si-MOSFET は「放射線に弱い」というのが定評である[1]。これまで Si-MOSFET 型水素センサに関する放射線劣化に関する研究は皆無であったので、極めて少ない照射時間(2-3 時間)で、高ドーズ量(～5MGy)放射光 X 線を照射できる SPring-8 は非常に魅力的であった。我々が開発してきた Pt-Ti-O ゲート Si-MISFET 型水素センサについて、FET 特性の劣化のデータを取得解析することを第一目的とした。特に、水素センサ特性劣化を左右するソースドレイン間リーク電流の増加がみられるか？しきい値電圧  $V_{th}$  がどの程度変化するか？に注目して実験を行った。

### 実験：

図 1 にセンサチップ[2]を示す。白円領域がセンサ FET 領域である。放射光 X 線照射実験では、センサチップを測定用ボードに貼り付ける(図 2)。センサ FET のソース・ドレイン・ゲートの各電極端子をコネクタより取り出し、センサ FET 領域を含む 1mmx2mm の領域に放射光を集光した。実験レイアウトを図 3 に示す。照射位置は光学カメラおよび、図 2 の In マーカを X 線カメラで確認し決定した。放射光は、単色器により 115keV に単色化、集光され、試料に照射された。実際に照射した集光放射光 X 線のビームプロファイル例を図 4 に示す。

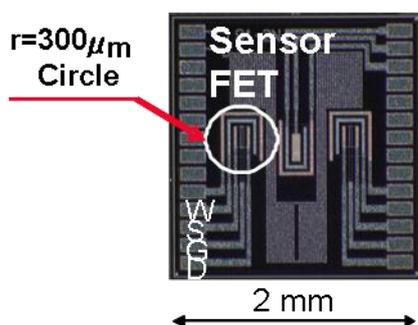


図 1. センサチップ

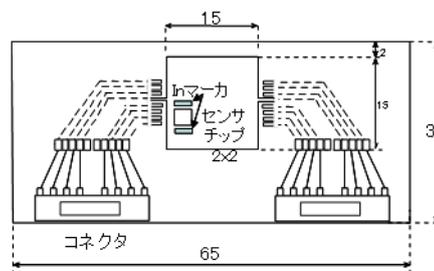


図 2. センサ FET 測定用ボード試料

X線を所定の時間照射し、I-V特性データを半導体パラメータアナライザで取得した。実際の実験では、基板に蓄積するキャリアを逃がすため、センサチップ裏面を設置筐体と同電位に設定した。



図3. 実験レイアウト

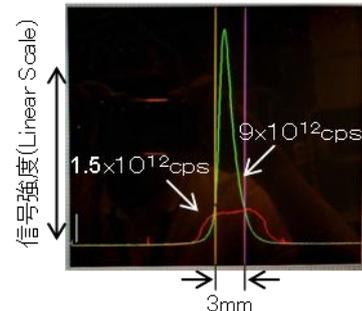


図4. 放射光 X 線のビーム強度分布

試料に入射する光子数を図1に示す白円センサ領域内光子数で換算し、放射光 X 線照射前後の比をチャネル移動度  $\mu$  のドーズ量依存性として図5に示す。図5は、本 115keV での照射実験以外にも、 $\gamma$  線照射及び 10keV 照射の実験データを載せている。図5中 115 keV でのドーズ量  $10^{14}$  に対応する試料(0.1825MGy 相当)の放射線照射前後の I-V 特性の変化を図6に示す。照射前後のバックグラウンドの違いは、I-V カーブ測定時の動作温度の違いによる、熱電子によるリークの影響である。但し、動作温度は異なるが、しきい値電圧  $V_{th}$  の温度特性は  $-2mV/^{\circ}C$  程度であり、 $115^{\circ}C$  では放射線照射により、サブスレッシユホールド領域 ( $V_g=0.0-1.5V$  領域) での S 因子 (I-V 特性の傾き) の劣化が見られる。

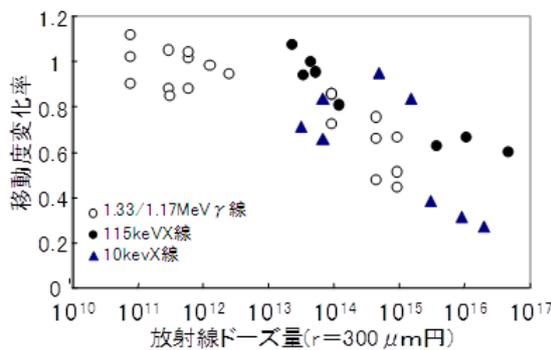


図5. 規格化移動度のドーズ量依存性

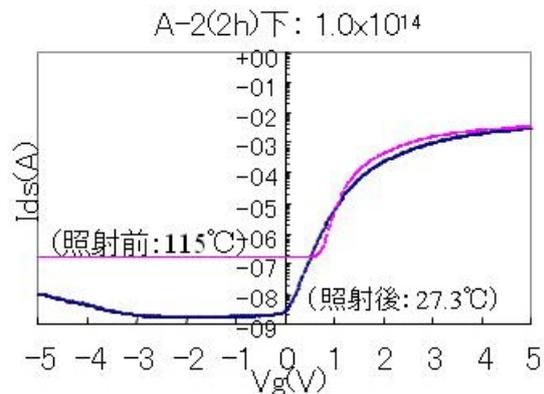


図6. 放射線ドーズ量  $10^{14}$  の I-V 特性

### 結果および考察：

飽和領域のソースドレイン電流  $I_{dss}$  は、Si-MOSFET 型ガスセンサのデバイスモデルを用いると、チャネル移動度  $\mu$ 、しきい値電圧  $V_{th}$ 、ゲート電圧  $V_g$  を用いて

$$I_{dss} = \mu C_{ox} W_g (V_g - V_{th})^2 / (2L_g) \quad (1)$$

と記述できる。ここで、 $C_{ox}$  はゲート単位面積当たりのゲート絶縁膜容量、 $W_g$  はゲート幅、 $L_g$  はゲート長である。(1)式は、ソース・ゲート間寄生抵抗  $R_{sg}$  が存在しても適用できる。図5の移動度  $\mu$  は、 $V_{th}$  を外挿法で求め、 $V_g - V_{th} = 1.0V$  の時の  $I_{dss}$  の実験値を用いて導出したものである。移動度の劣化は、飽和領域のソースドレイン電流  $I_{dss}$  に比例するため、デジタル回路では、実効的に  $V_{th}$  が設計値から変化したことに対応するので、集積回路が動作できなくなるのは良く理解できる。一方、図6の例では、動作温度が異なるため明瞭に見えないが、負のゲート電圧領域でのドレイン電流のリーク電流の増大は見られないので、放射線照射による劣化は水素センサの動作には大きな影響を与えないことが分かる。つまり、放射線照射による FET のドレインと P-Well

間 PN 接合の劣化は見られず、予想外に放射線耐性があることが判明した。一方、 $V_{th}$  の取り方には任意性があり、図 6 に示す程度の変化であれば、設計技術で使いこなせる変化であることが分かった。

**今後の課題：**

これまでは特定構造のセンサ FET に注目して、放射線照射の対象にしてきたが、センサシステム構築の立場からは、今後様々なデバイス構造に対する放射線照射特性を比較検討する必要がある。

**参考文献：**

- [1] 増田、福井、辻, 日本原子力学会「2010 年秋の大会」予稿集 J42
- [2] T. Usagawa and Y. Kikuchi, *IEEE Sensors Journal*, **12** 2243–2248 (2012).