

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19040

研究課題名(和文)放射線暴露によって動作不能になった集積回路のその場回復技術に関する研究

研究課題名(英文)Study on On-site Recovery of Integrated Circuit Failed by Gamma Ray Irradiation

研究代表者

田中 秀治(Tanaka, Shuji)

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：00312611

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文): 線による集積回路のダメージは、主にゲート酸化膜のチャージアップによって起こる。本研究では、集積回路にマイクロヒータを形成し、加熱によってディスチャージを促進し、線ダメージからの回復を試みた。リングオシレータとネットワークセンサ用LSIを用いて実験を行った。前者の発振周波数は線照射と加熱によって変化するが、その変化に一貫性はなく、マイクロヒータと外部ヒータを用いた実験で明確な回復は証拠付けられなかった。次に、後者の電源端子の電流-電圧特性に注目し、実験を行った。その結果、線照射によって電流が減り、加熱によって回復することが確認された。ただし、この効果の実用にはさらなる研究が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島第一原子力発電所の廃炉推進のために、強力な放射線(主に線)のもとでも継続的に使えるセンサや集積回路が必要である。線暴露による集積回路のダメージは、主にゲート酸化膜にトラップされたチャージによって起こる。したがって、これをマイクロヒータを用いた加熱によって逃がすことができれば、回復の可能性はあるが、これまでに実用的な集積回路を用いてそれを調べた研究はない。本研究では、民間CMOSファンドリで作製された集積回路を用いて、その可能性を調査した。電源端子の電流-電圧特性に注目すると、線ダメージからの回復が認められ、この効果の実用性を検討するためにさらに研究することの価値を見出した。

研究成果の概要(英文): Gamma-ray damage of IC is mainly caused by the charge-up of gate oxide with holes. In this study, we investigated the feasibility of the recovery from the gamma-ray damage using a microheater integrated on the IC, which might promote the discharge by heating. A ring oscillator and a network sensor LSI were served for experiments. The frequency of the ring oscillator changed by gamma-ray irradiation and heating. However, the frequency change was not consistent, and we did not find a clear evidence which supported the damage recovery by heating. Then, another series of experiments was conducted using the network sensor LSI in terms of the current-voltage characteristics of its power supply. As a result, it was confirmed that the current decreased by gamma-ray irradiation and recovered by heating. Regardless of this positive result, a further study is necessary to practically utilize this effect.

研究分野：マイクロ・ナノ工学

キーワード：線ダメージ 集積回路 マイクロヒータ MEMS

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の廃炉推進のために、強力な放射線（主に γ 線）のもとでも継続的に使えるセンサが必須であるが、このような過酷環境では、集積回路は短期間のうちにしばしば機能不全に陥る。これは γ 線に晒されるイメージャで特に深刻な問題である。 γ 線による集積回路のダメージは、集積回路に γ 線が入射すると電子-ホールペアができ、移動度の小さいホールがゲート酸化膜にトラップされて絶縁膜、および絶縁膜/半導体界面チャージアップすることによって起こる。その結果、トランジスタの閾値がシフトし、集積回路が動作不能になる。

これを防ぐ方法は、最も単純には集積回路をシールドすることであるが、この方法は少なくともイメージセンサには適用できない。廃炉作業は遠隔操作ロボットを用いて行うが、その操作・制御のためにイメージセンサは最も重要なセンサである。また、シールドは重いため、遠隔操作ロボットの電池寿命や運動性能に悪影響を与える。また、別の方法は、 γ 線によって電子-ホールペアを生成しにくいワイドバンドギャップ半導体を用いることである。しかし、そのような半導体を用いた集積回路はほとんど実用化されておらず、遠隔操作ロボットに必要な各種集積回路を製作することは、非現実的である。

2. 研究の目的

上述の γ 線暴露による電子回路の動作不良は、材料的または構造的破壊によるものではない。したがって、酸化膜にトラップされたチャージを逃がすことができれば、回復できる可能性がある。この方法が可能であれば、集積回路の設計と製造のための既存のインフラストラクチャー（設計ツール、IP、CMOS ファブドリなど）をそのまま利用して、 γ 線ダメージから回復可能な集積回路を実現できる可能性がある。そこで、本研究は、既存の集積回路にダイヤモンド構造とマイクロヒータを形成し、局所加熱によるディスチャージの促進によって、 γ 線ダメージから回復させられるかどうかを調べることを目的とした。

3. 研究の方法

実験に用いる集積回路として、当研究室で過去に作製し、ウェハ小片が残っている次の2つのものを用いた。1つは簡単なリングオシレータであり、回路の専有面積は $110\ \mu\text{m} \times 240\ \mu\text{m}$ である。これは台湾・TSMC 0.18 μm Mixed-signal CMOS プロセスで作製されている。もう1つはイベントドリブン型ネットワークセンサのために開発したLSIである（以降、センサプラットフォームLSIと呼ぶ）。これは2.7 mm角のLSIであり、回路規模が大きい。これは台湾・TSMC 0.18 μm Mixed-signal CMOS プロセスで作製されている。

(1) 集積回路へのマイクロヒータとメンブレン構造の作製

図1に切断した試料の構造を示す。薄膜配線からなるマイクロヒータを集積回路上に作製し、シリコン基板を裏面から垂直に深く掘り下げて、マイクロヒータ形成部をメンブレン状にする。これによって、マイクロヒータ形成部の熱伝導と熱容量を減らし、より省消費電力で集積回路を加熱可能にする。メンブレンの厚さはおよそ $10\sim 50\ \mu\text{m}$ である。マイクロヒータ直下のメンブレンが厚くなっているのは、その部分の熱伝導を若干増やし、温度分布を均一化し、またホットスポットの発生によってマイクロヒータが断線するのを防ぐためである。

加熱の目標温度は 300°C とした。トラップされたチャージを逃がすためには、高温に加熱した方がよいが、一方、温度が高過ぎると、集積回路がダメージを受ける可能性がある。集積回路の製造工程や材料を考えると、 300°C 程度までの加熱は問題ないと考え、これを目標温度とした。なお、今回の目的を考えると、集積回路の長期信頼性は優先度の高い要求ではなく、加熱によって γ 線ダメージから回復できる回数が限られていても一定の有用性はある。この目標温度を踏まえ、マイクロヒータの設計は有限要素法を用いて行った。

2つの集積回路は、過去のプロジェクトにおいてウェハ納入オプション付きのシャトルサービスによって試作したものである。本研究では、その残りのウェハ小片を使用し、本学のMEMS試作設備を用いて、図2に示すMEMS工程でマイクロヒータとメンブレン構造を作製した。まず、集積回路の表面にマイクロヒータ、再配線、ボンディングパッドなどを形成する。マイクロヒータの材料はPt/Taである。次に、フォトリジストマスクと酸化膜マスクを用いた2段階DRIE

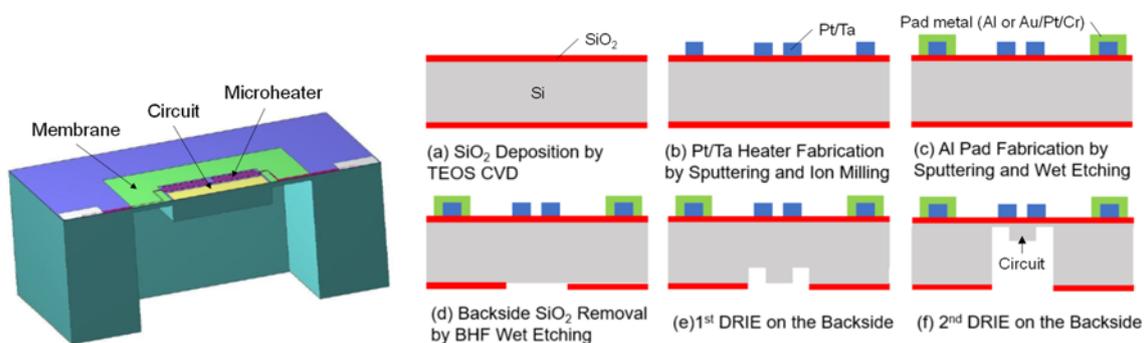


図1 試料の構造

図2 マイクロヒータとメンブレン構造の作製工程

(Deep Reactive Ion Etching) によって集積回路裏面を掘り下げ、メンブレン構造を作製する。

(2) リングオシレータを用いた γ 線ダメージからの回復実験

γ 線照射実験は、量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所との共同研究として行った。同研究所の γ 線照射施設を用いて、マイクロヒータなし・ありの2種類のリングオシレータにいくつかの条件で γ 線を照射し、本学に戻ってから加熱実験を行った。マイクロヒータのない試料は空気中でホットプレートを用いて加熱した。集積回路の評価指標としては発振周波数を用いた。 γ 線照射前、照射後、および加熱後に発振周波数を測定し、その変化を記録した。

(3) センサプラットフォーム LSI を用いた γ 線ダメージからの回復実験

本実験には、表面再配線のみ形成した試料(図2において工程(c)までの試料)、およびマイクロヒータとメンブレン構造を形成した試料を用意した。しかし、後者に対しては、本成果報告書を執筆している時点で γ 線照射実験は実施できていない。新型コロナウイルス感染症が収束次第、実験を行う予定である。したがって、ここではマイクロヒータなしの試料に対して行った γ 線ダメージからの回復実験について述べる。

γ 線照射実験は、(2)と同様に量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所との共同研究として行った。集積回路の評価指標としては、1.2 V デジタル回路の電流-電圧特性を用いた。センサプラットフォーム LSI は多くの機能を有する複雑な LSI であり、前述の評価指標が初期値であるからといって γ 線ダメージがない、あるいはそれから回復したとは言えない。また、 γ 線ダメージによってそれらの指標が必ず変化すると限らない。しかし、LSI のどこかのブロックに異常が起きれば、電源の電流-電圧特性が変化する可能性が高く、また、電流-電圧特性は今回の実験で評価しやすいことから、これを評価指標として採用した。

4. 研究成果

(1) 集積回路へのマイクロヒータとメンブレン構造の作製

マイクロヒータ・メンブレン構造を作製したリングオシレータとセンサプラットフォーム LSI を、それぞれ図3 (a)と(b)に示す。マイクロヒータは遠赤外線カメラを用いて評価した。試料をホットプレートに載せ、遠赤外線カメラで観察し、試料の温度と遠赤外線イメージとの関係を予め取得してキャリブレーションデータとした。リングオシレータ上のマイクロヒータに 0.5 W (20 V, 25 mA) を供給することで、リングオシレータ部を局所的に 300°C 以上に加熱できることを確認した。この測定は空気中で行ったが、真空中(パッケージ内)であれば、より小さな電力で加熱が可能である。センサプラットフォーム LSI 上のマイクロヒータは、新型コロナウイルス感染症が収束次第、評価する予定である。

(2) リングオシレータを用いた γ 線ダメージからの回復実験

最初にマイクロヒータなしの試料に 300 Gy/h のドーズで γ 線を照射し、共振周波数の変化を観察した。 γ 線照射量は約 150 Gy または約 300 Gy である。図4に4つの試料(#1-1, #1-2, #1-3, #1-4) についての結果を示す。1つの試料に4つのオシレータがあり、それらを A, B, C, D と呼んでいる。ここからわかるように、 γ 線照射によって共振周波数は上がることも下がることもあり、一貫した変化傾向を示さない。 γ 線照射の影響が PMOS と NMOS とで異なり、また、確率的過程を含むことがその理由かもしれない。試料#1-2 のオシレータ C は、300 Gy 照射後、発振しなくなった。なお、図4にはデータを欠いているものがあるが、それは、プロービングパッドの破損などの測定中のトラブルによる。

図5 (a)に試料#1-2 を、350°C のホットプレート上で1時間×2回、加熱したときの発振周波数変化を示す。図4 (b)に示した通り、この試料は γ 線照射によって発振周波数が下がったので、加熱によってそれが回復したようにも見える。また、合計2時間の加熱後、不動となっていたオシレータ C が再び 882 kHz で発振した。試料#1-4 に対しては、より測定タイミングを増やして加熱実験を行った。図5 (b)に示すように、発振周波数は一旦上がり、そして徐々に下がる変化を示した。比較実験として、 γ 線を照射していない試料1つも 350°C で加熱し、発振周波数の変化を測定した。4つのオシレータのうち3つでは、発振周波数はほとんど変化しなかったが、1つは合計3時間の加熱によって 9 Hz の上昇を示した。これは、図5に示した変化と比較して必ずしも小さいとは言えない。以上のことから、加熱による γ 線ダメージからの回復を示唆する結果もあるが、「効果あり」と結論することはできない。

次に、マイクロヒータありの試料(#2-1, #2-2,

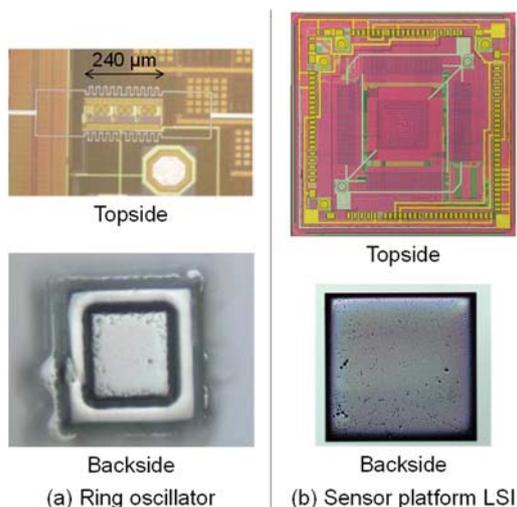


図3 マイクロヒータとメンブレン構造

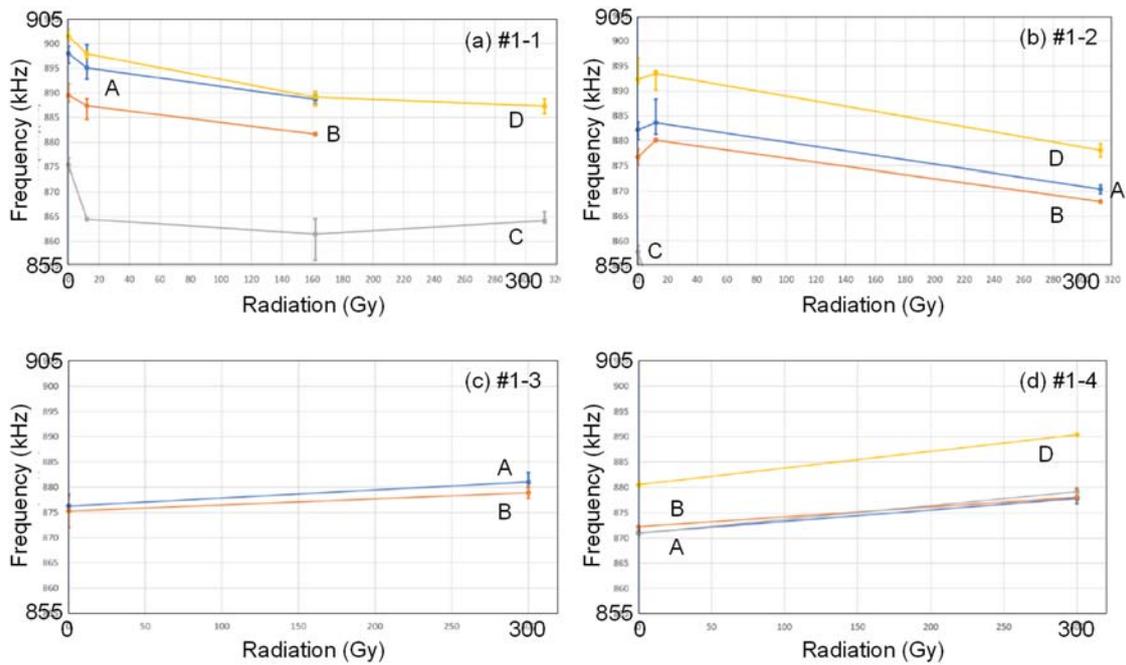


図4 リングオシレータに γ 線を照射したときの発振周波数の変化 (試料#1-1~4)

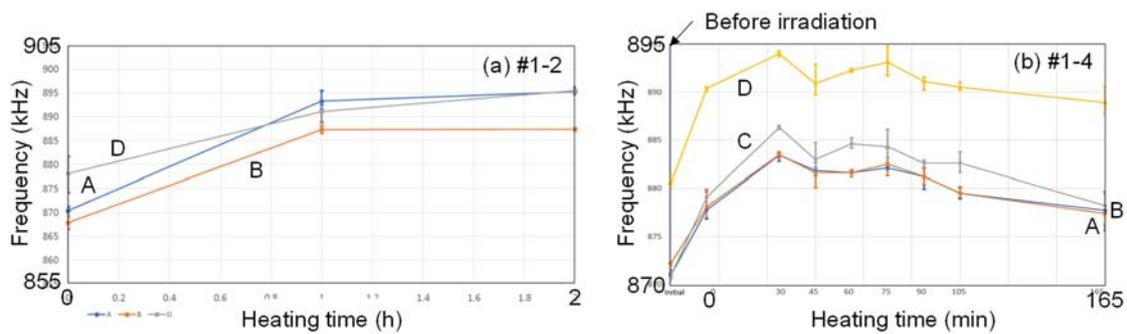


図5 γ 線を照射したリングオシレータの加熱による発振周波数の変化 (試料#1-1~4)

#2-3) を用いて、 γ 線照射・加熱実験を行った。上述の結果から、発振周波数を評価指標とすることは難しいことがわかったので、発振しなくなったリングオシレータが、加熱後、再び発振する事例が複数得られれば、加熱による γ 線ダメージからの回復効果がはっきりと示せると考え、1 kGy/h と高いドーズで最大 10 kGy までの照射を行った。図4に発振周波数の変化を示す。マイクロヒータなしの試料についての実験結果と同じように、発振周波数は上がったたり下がったりし、やはり一貫性のある変化傾向は認められなかった。試料#2-1 のオシレータ C は 1 kGy 照射後、発振しなくなったが、その他のオシレータは 10 kGy 照射後も発振した。

そこで、試料#2-1 を加熱試験に供した。本実験には前述のマイクロヒータを利用し、加熱温度は 350°C とした。3 時間の加熱を行ったが、オシレータ C が再び発振することはなかった。この結果からも、マイクロヒータによる加熱が γ 線ダメージからの回復に効果があるとは結論できない。

(3) センサプラットフォーム LSI を用いた γ 線ダメージからの回復実験

まず、表面再配線のみ形成した 2 つの試料に 1 kGy の γ 線照射を行い、1.2 V デジタル回路の電流-電圧特性の変化を評価した。各試料には複数のセンサプラットフォーム LSI が入っているが、LSI ごとに 1.2 V 電源に吸い込まれる電流は増えたり減ったりし、一貫した変化を示さなかった。具体的には、10 個で電流が増え、8 個で減り、21 個ではほとんど変化しなかった。また、10 個はデジタル信号を出力しなくなった。これは、前述のリングオシレータを用いた実験のそれと同じような結果とも言えるが、本実験の目的からすると不都合である。ここで、このような結果となったのは、表面再配線の加工時に LSI に加わった「ダメージ」によるのではないかと考え、以降、表面再配線後の試料を 300°C で 1 時間、窒素中でアニーリングして「ダメージ」の除去を試みてから、 γ 線照射・加熱実験に供した。

実験は次のように行った。2 つの試料 (#1, #2) を用意し、まず、1 kGy/h のドーズで 1 kGy の γ 線照射を行い、その後、試料#1 に対しては 300°C × 3 時間、試料#2 に対しては 150°C × 1 時

間の条件でホットプレートによる加熱を行った。ここまですを第一段階と呼ぶ。次に、第二段階として、2つの試料に対してさらに5 kGy/hのドーズで5 kGyの γ 線照射を行い、その後、300°C×1時間の条件で加熱を行った。そして、各ステップで1.2 V電源電流の変化を測定した。ただし、第一段階での電流測定分解能は1 mAと不十分であったため、第二段階では0.1 mAと改善した。また、比較として γ 線照射をしない試料(Ref.)を用意し、第一段階、第二段階それぞれで300°C×1時間の加熱を行った。

図7 (a), (b)にそれぞれ第一段階、第二段階の結果をまとめる。第一段階の γ 線照射によって電流は下がる傾向を示した。ただし、電流測定分解能は1 mAであるので、図7 (a)の意味するところは、もともとほとんどのLSIが6 mAを示していたが、 γ 線照射後、5 mAを示すものが増えたということになる。300°C×3時間の加熱を行った試料#1では、全てのLSIで電流が6 mAに戻ったのに対して、150°C×1時間の加熱を行った試料#2には変化が見られなかった。試料Ref.でも、加熱後、全てのLSIが6 mAを示した。

第二段階の γ 線照射によっても電流は下がる傾向を示した。試料#2で電流の低下が大きいのは、第一段階の γ 線ダメージが残っていたためだと考えられる。加熱後、試料#1, #2のいずれも電流の回復を示し、試料#1, #2, Ref.でおおよそ同じ電流値となった。以上の結果は、300°C×1時間程度の加熱で γ 線ダメージからの回復効果があることを示唆している。

以上のことから、研究成果は以下のようにまとめられる。

1 kGy オーダの γ 線を照射すると、集積回路は明らかに影響を受ける。その影響は、リングオシレータ発振周波数のように、一見、一貫性のない変化を示す場合もあれば、センサプラットフォームLSIの1.2 V電源電流のように、一貫した変化として現れる場合もある。後者は本研究にとって好都合であり、その測定結果から300°C×1時間程度の加熱で γ 線ダメージからの回復効果があることが示唆された。また、150°C×1時間の加熱は不十分であることもわかった。

本研究では、既存の集積回路を用いて実験を行ったため、個々の素子(トランジスタ、ダイオード、キャパシタなど)が γ 線照射と加熱によってどのような影響を受けるかまでは調査できていない。今後、これらを調べることによって、マイクロヒータを用いた加熱によって γ 線ダメージから回復可能な集積回路の実現に繋がる可能性がある。

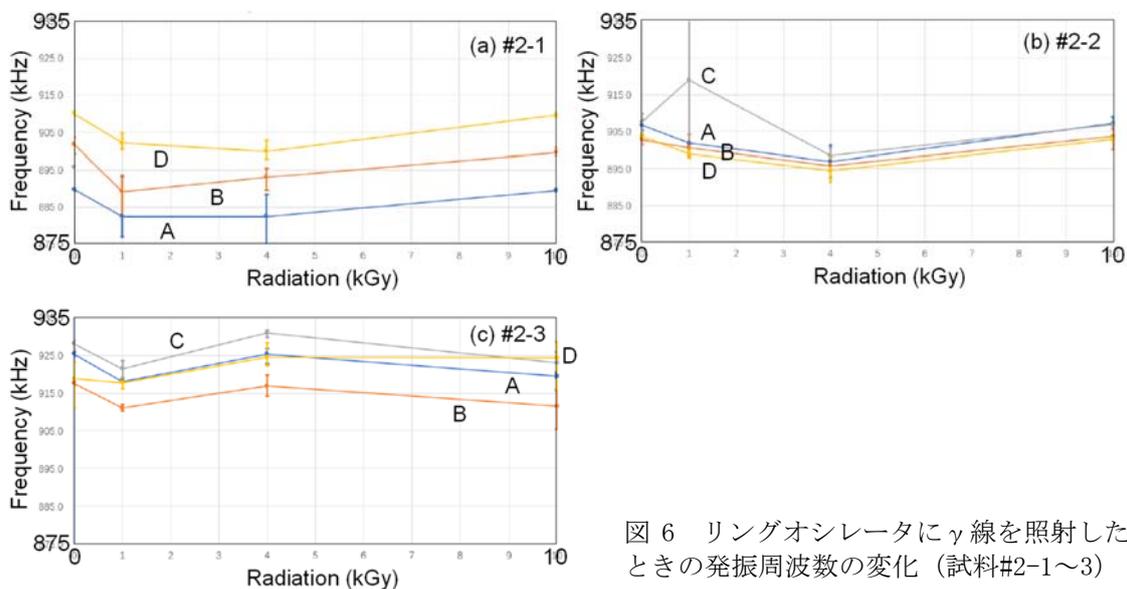


図6 リングオシレータに γ 線を照射したときの発振周波数の変化(試料#2-1~3)

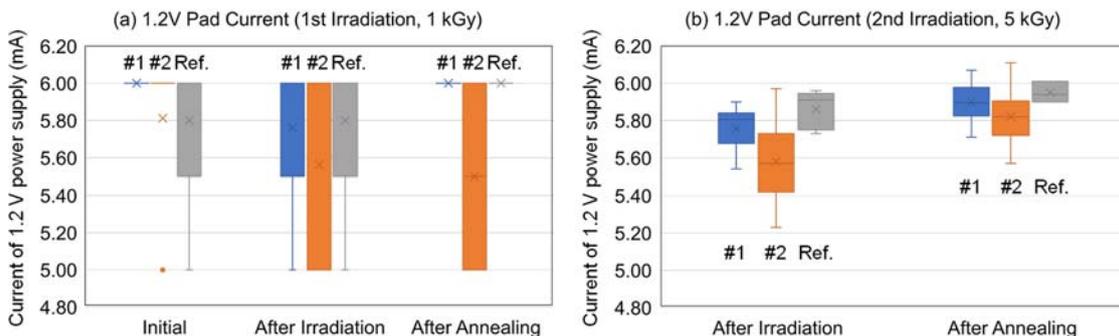


図7 センサプラットフォームLSIに対する γ 線照射・加熱実験の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Gong Tianjiao, 鈴木 裕輝夫, 田中 秀治	4. 巻 -
2. 論文標題 ガンマ線照射ダメージその場回復のためのメンブレン型ヒータ集積化LSI	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第11回集積化MEMSシンポジウム講演会論文集	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Gong Tianjiao, 鈴木 裕輝夫, 田中 秀治
2. 発表標題 ガンマ線照射ダメージその場回復のためのメンブレン型ヒータ集積化LSI
3. 学会等名 第11回集積化MEMSシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所との共同研究

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鈴木 裕輝夫 (Suzuki Yukio)	東北大学・マイクロシステム融合研究開発センター・講師 (11301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	大島 武 (Ohshima Takeshi)	量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所先端機能材料研究部・部長・上席研究員 (82502)	
研究協力者	牧野 高紘 (Makino Takahiro)	量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所先端機能材料研究部・主任研究員 (82502)	
研究協力者	武山 昭憲 (Takeyama Akinori)	量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用研究所先端機能材料研究部・主任研究員 (82502)	