

レーザー照射によるオープン故障 LSI の論理の固定化

真田 克, 安富泰輝

(受領日: 2011 年 4 月 25 日)

高知工科大学工学部システム工学群

〒 782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口 185

E-mail: sanada.masaru@kochi-tech.ac.jp

要約: 不安定な出力論理を有するフローティング・ゲート故障に対して出力論理値を固定化する実験を行った。実験はゲートオープン故障を作り込んだ Inverter 回路に外部からレーザーを照射する方式である。その結果、出力論理は“H”固定した。同時に IDD 値も変動した。この変動値は正常状態の特性の動作点に一致した。レーザー照射を止めると特性は元の状態に戻った。この現象を検証するためにゲート電極を共通にした Inverter 回路の一方側にレーザーを照射し他方側の出力を測定した。その結果“H”に固定した。この実験はレーザーを照射することで形成される電子がフローティング・ゲート電極へ入り込み電圧を低下させていると考える。単体 Tr によるレーザー照射実験と合わせてこの現象を述べる。

1. はじめに

LSI は大規模化、微細構造化、多層配線構造化が進み、物理解析のみでの故障箇所の特特定は技術的に困難になってきている。さらに実施に際して膨大な工数を費やす傾向になってきている。そのため、ソフトを用いて故障候補を絞込みその候補に対して物理解析を行う診断の介入が必要不可欠になってきている。これまで SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) と同程度の高い診断精度と簡易な操作による診断技術を開発してきた(1)(2)。これらはショート故障に対して故障論理をほぼ正確に識別でき故障候補を特定できたが、オープン故障に関しては故障候補の特定に困難を極めていた。理由はオープン故障に伴う信号配線が外的要因(熱や光)及び、隣接する配線論理の変化に影響を受けるため論理や電流値が不安定となるためである(3)。

このような背景にあって、オープン故障に対する診断精度向上のために隣接する配線論理とのカップリング効果による論理の印加現象を用いた方式(4)(5)や、故障の顕在化のために LSI 表面の上部に電界を印加し、変化する電流と印加位置のマッピングから故障箇所を特定する物理解析の方法(6)が報告されている。しかし、前者は LSI の進展に伴う配線長の短縮化や周辺回路の多様な論理状態はカップリング効果による論理の確定精

度を難しくする欠点がある。後者は nA オーダという微小な変化のため DSM 化が進む LSI に対して IDD 値の変化の特定が困難となる欠点にある。

このような困難さの中にあって、オープン故障に対して論理や電圧値を固定化することができればモデル化が容易となり診断精度が大幅に向上でき、さらには故障箇所を顕在化することができる。その基本となる手法に LADA (laser Assisted Device Alteration) がある(7)。これはゲート電圧を印加した正常回路においてクリティカルパスの検出や信号伝搬の遅れの原因となる不良箇所を特定する評価方法である。手法はドレイン部に $\lambda = 1100\text{nm}$ 以下のレーザーを照射したとき発生するキャリアが寄生容量間へ堆積することで入力信号に同期して変化するキャリアのチャージ、ディスチャージ速度を変化させ論理のタイミングを制御することを利用した手法である。本文で報告する方式もレーザー照射により発生するキャリアが素子へ与える影響を利用する方法であるが、ゲートオープン故障という異なった状態でのキャリアの挙動で不安定論理を固定化する点で LADA と異なる方式である。

本論文はこの論理固定化のための実験報告である。まず 2 章にてオープン故障に伴う論理の固定化のために用いたレーザー照射法について説明する。3 章にて Inverter 回路を用いた実験について

述べた後、4章にて論理の固定化の検証実験を、次章にてこの考察を行う。6章にて論理が固定化した現象の考察をのべ、最後にまとめを行う。

2. 実験用回路と測定設備

実験回路はVDEC(0.18 μ mルール at VDD=1.8v)で設計したインバータ回路を用いた。Trはside-wallをもつLDD(Lightly Doped Drain)構造であり、レーザ光はこのside-wallのCVD膜を介してTr基部へ照射される(以降の断面図ではこの構造を省略している)。又、これらの回路を構成するNchトランジスタ(NchTr)、Pchトランジスタ(PchTr)のゲート長は共に0.18 μ mである。W値(ゲート幅)はWNchTrを2 μ m、WPchTrを4 μ mとすることでしきい値をVDD/2に調整している。実験回路はパッドが設けられており、プロービングを行うことで電圧の入出力および電流の測定を行う。図1にInverter回路とそのレイアウト図を示す。

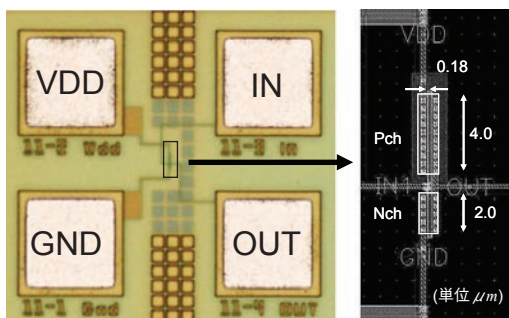


図1 Inverter回路とレイアウト図

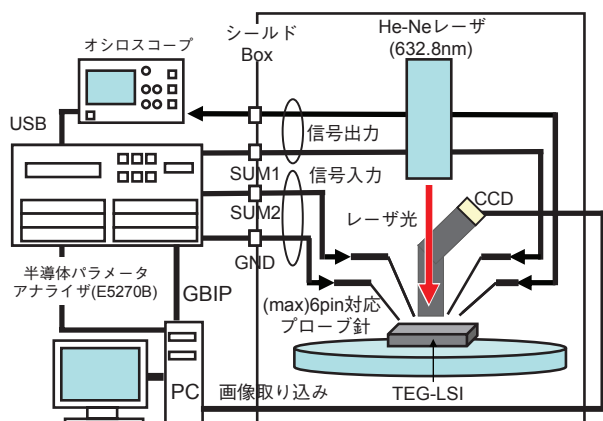


図2 実験装置

実験装置は図2に示すようにシールドBox内に設置したプロービング機能を有する顕微鏡と回路に刺激を加えるレーザ光源及び、シールドBox外に設置した半導体パラメータアナライザ、電圧印加装置、オシロスコープ及び、制御用PCか

らなる。Box内での測定信号は同軸ケーブルを介してBox外の機器に接続されている。実験に用いたレーザは強度4mWのHe-Neレーザ(波長632.8nm)である。測定はプログラムにより制御される。

3. Inverter回路に対するレーザ照射実験

Inverter回路に対してレーザ照射実験を行い出力値Vout、及び、貫通電流値IDDを測定した。レーザは回路上部から回路全面に照射する(8)(9)(10)。

3.1 初期特性

図3はInverterのゲート電圧を0vから1.8vへ変化させた正常回路とゲートをオープンとした故障回路のVin-Vout特性及び、Vin-IDD特性である。オープン状態での出力特性はVout:1.6v、IDD:170 μ A程度である。オープン状態での出力特性は測定の度に变化する。

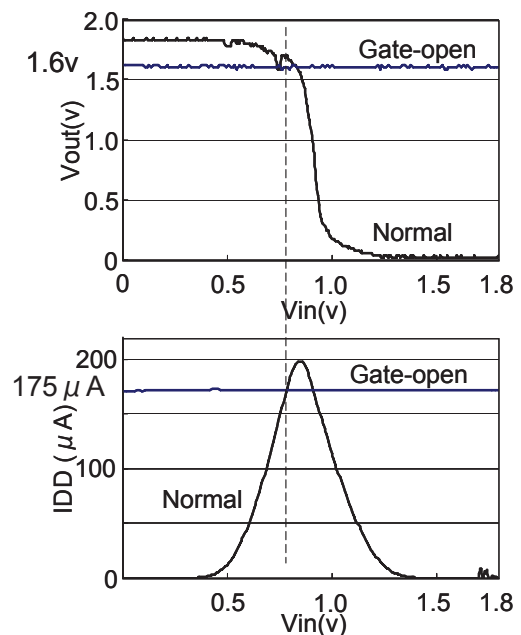


図3 ゲートオープン状態と正常状態でのVin-Vout, Vin-IDD特性

3.2 レーザ照射実験

フローティング・ゲート状態のInverter回路にレーザ照射を行い、出力特性Vout、IDDを測定した。図4はInverter回路へのレーザ照射の様子を示す。レーザ照射域は約55 μ m Φ であり回路全体に照射される。

3.2.1 レーザ照射による特性の変化

レーザ照射による特性の変化を図5に示す。ゲートオープン状態での初期値は $V_{out}:1.4v$ 、 $I_{DD}:200\mu A$ であった。レーザを照射すると $V_{out}:1.8v$ 、 $I_{DD}:0\mu A$ と H 論理状態に変化した。そして、レーザ照射を止めると V_{out} は一端 $0.5v$ 近辺まで低下するが時間とともに初期の $1.4v$ 近辺へ上昇した。 I_{DD} 値は照射停止と同時に $200\mu A$ 近辺に上昇した。以上の現象はレーザ照射により出力論理が H に固定され、照射を止めると元に戻った。

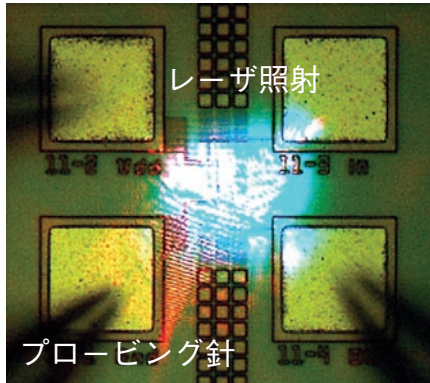


図4 Inverter 回路へのレーザ照射の様子

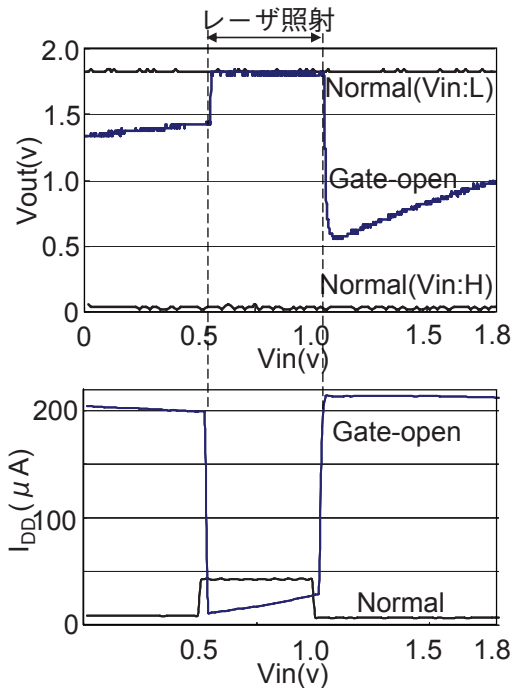


図5 レーザ照射による特性の変化

ここで正常 Inverter 回路にレーザを照射しても論理状態ほとんど変化しないが I_{DD} 値は約 $50\mu A$ 増加している。この現象は OBIC による光電流 (I_{ph}) である。

3.2.2 連続回の繰り返しによる特性の変化

ゲートオープンによる中間電位が高い場合と低い場合について照射繰り返しによる特性の変化をみた。

＜中間電位が高い場合＞

ゲートオープン状態で $V_{out}:1.6v$ 、 $I_{DD}:140\mu A$ を示す Inverter 回路に複数回のレーザ照射を行い、 V_{out} 値及び、 I_{DD} 値の変化を観察した。その結果を図6に示す。図中 A、C はレーザ照射なし、B、D はレーザ照射時の特性を示す。レーザ照射 ON/

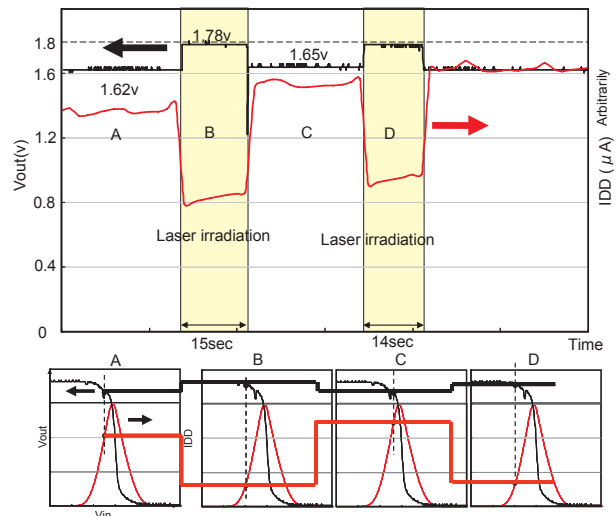


図6 ゲートオープンで $V_{out} 1.62v$ を示す Inverter 回路の複数回レーザ照射による V_{out} / I_{DD} 特性図及び、動作箇所 A、B、C、D の正常 $V_{in}-V_{out} / I_{DD}$ 特性上での動作点への対応図 (変化傾向の一致が見られる)

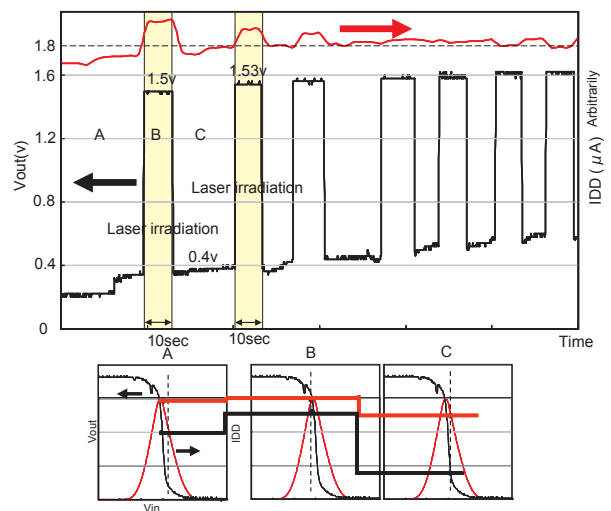


図7 ゲートオープンで $V_{out} 0.4v$ を示す Inverter 回路の複数回レーザ照射による V_{out} / I_{DD} 特性図及び、動作箇所 A、B、C の正常 $V_{in}-V_{out} / I_{DD}$ 特性上での動作点への対応図 (変化傾向の一致が見られる)

OFF の繰り返しにて中間電位状態と H 固定状態が繰り返されている。これら A、B、C、D の動作点を正常動作における V_{in} - V_{out} / I_{DD} 特性の動作点に対応させると変化の傾向は一致した。

＜中間電位が低い場合＞

ゲートオープン状態で $V_{out} : 0.4v$ 、 $I_{DD} : 200 \mu A$ を示す Inverter 回路に複数回のレーザ照射を行い、 V_{out} 値及び、 I_{DD} 値の変化を観察した。その結果を図 7 に示す。図中 A、C はレーザ照射なし、B はレーザ照射時の特性を示す。レーザ照射 on/off の繰り返しにて中間電位状態と H 状態 (1.5v 近辺) が繰り返されている。これら A、B、C の動作点を正常動作における V_{in} - V_{out} / I_{DD} 特性の動作点に対応させると変化の傾向は一致した。

4. 論理の固定化現象の検証実験

ゲートオープン状態の Inverter 回路にレーザを照射すると H 論理に固定化した現象を検証するために、ゲート電極を共通にした Inverter 回路及び、単体 Tr を用いて検証実験を行った。

4.1 ゲート電極を共通にした Inverter 回路による実験

Inverter 回路へのレーザ照射実験からゲート電極に同期して特性が変動するのではないかと推測される。そのため、図 8 に示すようにゲート電極を共通にした Inverter 回路を $150 \mu m$ 離れたレイアウトを作成し、一方側の Inverter 回路にレーザ照射をすることで、照射されない他方側の Inverter 回路の出力特性を測定した。

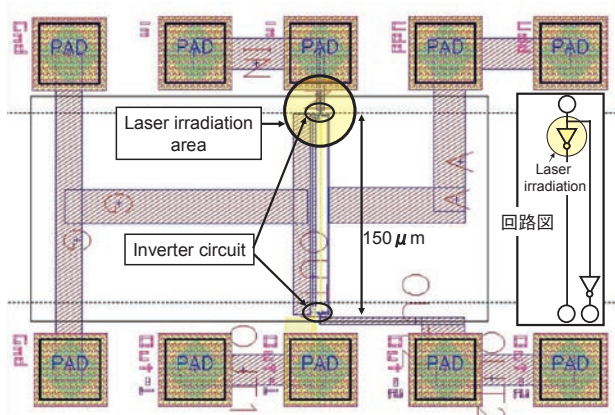


図 8 ゲート電極を共通にした Inverter 回路を $150 \mu m$ 離れたレイアウト図と回路図 (右側に表示)

一方側回路へレーザ照射を行う

結果を図 9 に示す。レーザ照射を行った一方側の Inverter 回路は照射タイミングに同期して出力が中間電位と “H” を繰り返した。そして、この変化に同期してレーザ照射されない他方側の Inverter 回路の出力もほぼ同一の出力傾向を示した。

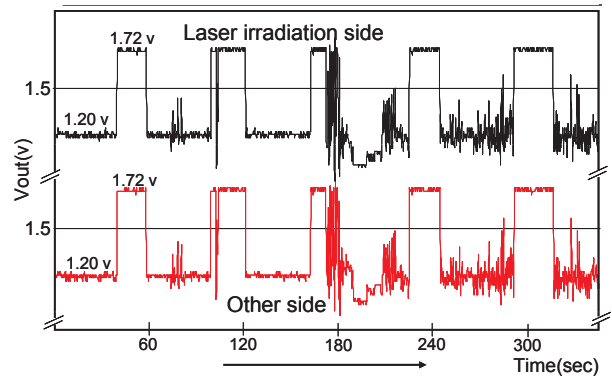


図 9 一方側 Inverter 回路へのレーザ照射に同期して変化する他方側 Inverter 回路の出力の観測結果

4.2 単体トランジスタによる実験

図 10 に示す単体トランジスタ (PchTr、NchTr) に対してレーザ照射による特性変動を検証した。

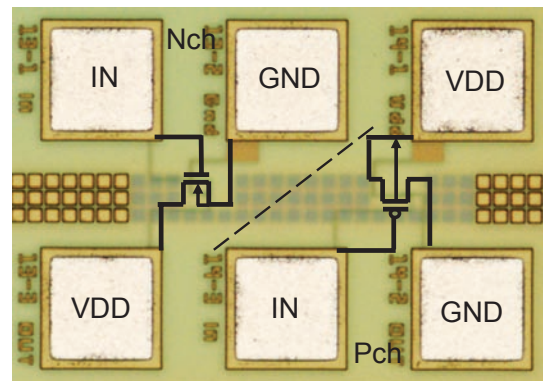


図 10 単体トランジスタ (PchTr、NchTr) のレイアウト図

4.2.1 PchTr に対する実験

PchTr に対してレーザ照射実験を行った。測定回路と結果を図 11 に示す。測定は電源 VDD (1.8v) から電流計 (A) を介してソース (S) 電極へ、GND はドレイン (D) 電極へ接続した構成である。まず、ゲート (G) 端子に電圧を印加して正常動作を確認した後、ゲート電圧 $0v / 1.8v$ を印加した状

態及び、オープン状態でレーザを照射し貫通電流値(IDD)の変化を測定した。

その結果

- ① $V_g=0v/1.8v$ にて Tr は on/off 状態でありレーザ照射による IDD($1150\mu A/0\mu A$) の変化はなかった。
- ② オープン状態での照射実験は 7 サンプル中 4 サンプルに IDD の増加 ($400\mu A$ から $50\mu A$ の電流増加) を確認した。変化はレーザ照射の初期段階で約 $50\mu A$ 増加後、最大 $400\mu A$ の増加が見られた。
- ③ レーザ照射による IDD 値の変化は照射終了後もその状態を持続した。

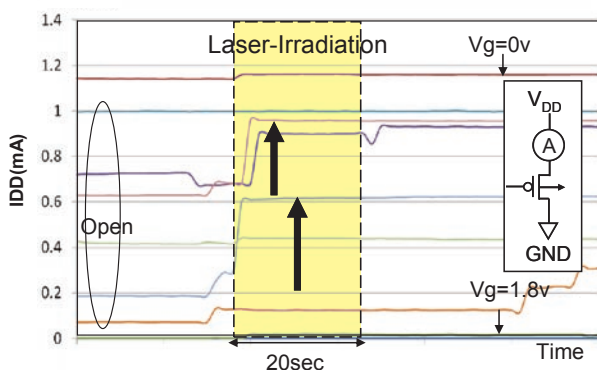


図 11 ゲートオープン及び $0v/1.8v$ 印加の PchTr へのレーザ照射による IDD 値の変化状態図

4.2.2 NchTr に対する実験

NchTr に対してレーザ照射実験を行った。測定回路と結果を図 12 に示す。測定は電源 VDD($1.8v$) から電流計(A)を介してドレイン(D)電極へ、GND はソース(S)電極へ接続した回路である。まず、ゲート(G)端子に電圧を印加させ正常動作を確認した後、及び、ゲート電圧を $0v/1.8v$ 印加した状態及び、オープン状態でレーザ照射し貫通電流値(IDD)の変化を測定した。

その結果

- ① $V_g=0v/1.8$ にて Tr は off/on 状態でありレーザ照射による $I_s(0\mu A/1250\mu A)$ の変化はなかった。
- ② オープン状態での照射実験は 3 サンプル中 2 サンプルにレーザ照射の初期段階で数十 μA の増加後、最大 $100\mu A$ の低下が見られた。
- ③ オープン状態の 2 サンプルは照射終了後に初期オーダに戻った。

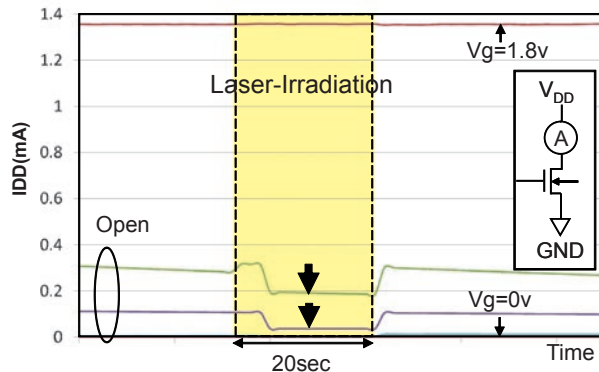


図 12 ゲートオープン及び $0v/1.8v$ 印加の NchTr へのレーザ照射による IDD 値の変化状態図

5. 検証実験の考察

検証実験が示す結果について考察した。

- ① ゲート電極を共通にした Inverter 回路の実験
レーザ照射をしない他方側 Inverter 回路の出力が照射を行った一方側の Inverter 回路の出力状態と一致している。このことはゲート電圧の影響以外は考えられず、レーザ照射がフローティング・ゲートの配線に論理の影響を与えることを示している。
この現象から単体 Tr の挙動は明確になる。

- ② PchTr に対する実験

図 13 は PchTr の断面図である。レーザ照射により S、D と N-Well 間及び、Well と基板間の接合部に電子(e)-正孔(h)対が生成される。N-well 内に閉じ込められた電子は Well 電極を介して VDD 側へ、D 部の正孔は GND へ流れる。

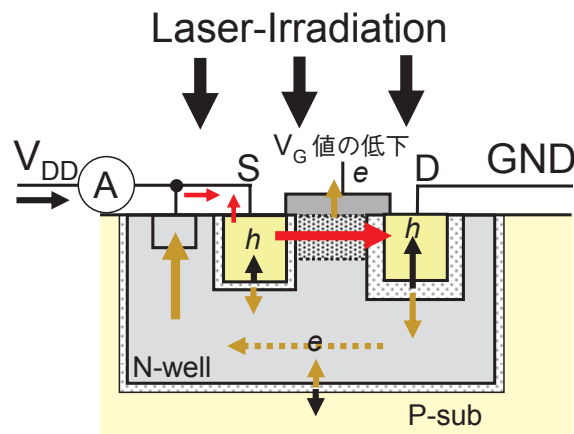


図 13 レーザ照射によるキャリアの挙動を示すゲートオープンの PchTr の断面図

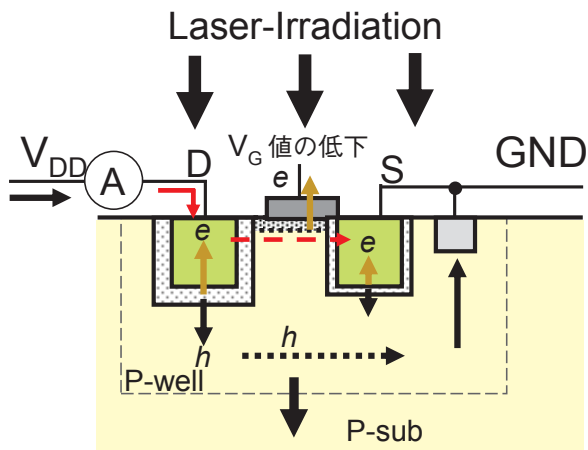


図 14 レーザ照射によるキャリアの挙動を示すゲートオープンのNchTrの断面図

③ NchTr に対する実験

図 14 は NchTr の断面図である。レーザ照射により S、D と P-Well 間の接合部に電子 (e)- 正孔 (h) 対が生成される。well 内に発生した正孔は well 電極を介して GND 側及び、P-sub へ流れる。同時に D 部に発生した電子は D 端子を介して VDD へ流れる。さらに、①の考察結果からゲート配線中へ電子が入り込むことによりゲート電圧が低下する。その結果、チャネル抵抗が増加し S から D への I_{DD} 値が減少する。以上、D 部での再結合電流とチャネル抵抗の増加による D-S 間電流の減少の合算値が VDD から GND へ向けて貫通電流の減少として現れたものと考ええる。

以上の結果はレーザ照射がゲート電極に影響を与えており、フローティング・ゲートの配線中に電子が入り込むことで中間状態の電圧を低下させていることを示していると解釈することで説明が付く。

6. 論理の固定化現象の考察

ゲートオープン状態の Inverter 回路にレーザを照射することで H 論理に固定化できた。この固定化の様子を図 15 に示す。現象は LDD 構造を有する Tr の Side-wall からレーザ光が PN 接合部へ照射され、電子-正孔対が発生する。この照射における急激なキャリアの発生は、電子を薄いゲート酸化膜を介してゲート配線へ入り込みゲート電圧を低下させる。一方、Inverter 回路のドレイン間は PchTr に正孔が発生し、NchTr に電子が発生し、これらは再結合する。Tr 形状の違い (WNchTr:

2 μm 対 W PchTr : 4 μm) から正孔が電子を上回り、この結果 H 側へシフトする。

以上の結果、ゲートオープン状態での Inverter 回路にレーザを照射することで H に固定化される現象を説明できる。

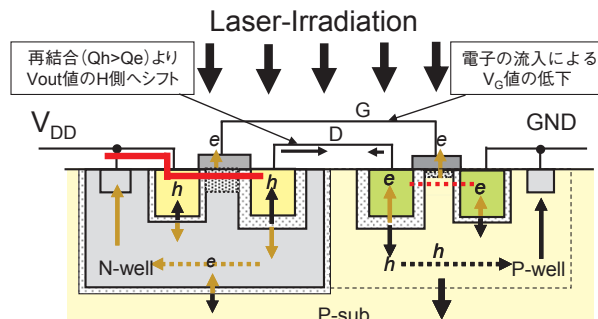


図 15 レーザ照射で Vout 値が H となるキャリア挙動を示すゲートオープンの Inverter 回路の断面図

7. まとめ

ゲート端子がフローティング状態の Inverter 回路にレーザ照射を行うと出力論理は“H”固定した。

この結果はゲートオープン故障における不安定論理を固形化することが可能となり、故障診断における精度向上をもたらす。

今回の実験結果はレーザ照射により電子がゲート酸化膜を介して配線へ入り込みゲート電圧を低下させることで説明ができたが、物理現象としてまだ確かめられていない。1 つには、フローティング・ゲートの配線上にプローバ針を立てるとその時点で任意の電圧に固定されてしまうことである。その状態でレーザを照射しても変化しない。

フローティング・ゲートのままで配線論理やゲート電流を識別するテスト用回路や技術の開発が必要である。

謝辞

本研究を進めるにあたり基礎実験や測定用 TEG パターンを設計頂いた研究室の卒業生である橋田啓示君 (現: ルネサスデザイン(株)) に感謝いたします。

文献

- (1) M. Sanada and Y. Yoshizawa, "Fault diagnosis

- technology based on transistor behavior analysis for physical analysis”, *Microelectronics Reliability*, Vol.46 Issues 9- 11 pp.1575-1580, 2006
- (2) 眞田, 吉澤, 則松, “スイッチング・レベル・シミュレーションを用いたセル内故障診断技術－リーク故障が論理動作に与える影響－”, *LSI テスティングシンポジウム /2005*, p.225-230
 - (3) 橋田, 眞田, “オープン故障がもたらす電気的特性の評価・解析”, *LSI テスティングシンポジウム /2008*, p.195-199
 - (4) 佐藤, 山崎, 山中, “LSI 故障診断の分解能向上手法”, *LSI テスティングシンポジウム /2002*, pp.101-106
 - (5) 高橋, 樋上, 相京, 高松, 山崎, 堤, 橋爪, 四柳, “オープン故障に対する一故障モデルの提案とその故障診断”, *LSI テスティングシンポジウム /2006*, p.181-186
 - (6) 小宮, 菊池, 嶋瀬, 向川, “LSI 断線箇所診断手法”, *LSI テスティングシンポジウム /2004*, pp.279-283
 - (7) J.A.Rowlette and T.M.Eiles, “Critical timing analysis in microprocessors using near-IR laser assisted device alteration (LADA)”, *IEEE ITC* pp.264-273, 2003
 - (8) 特願 2009 - 178418 号
 - (9) 橋田, 眞田, “オープン故障がもたらす電気的特性の評価・解析” *LSI テスティングシンポジウム /2008*, pp.195-199
 - (10) 眞田, 橋田, 安富, “レーザ及び, 電界を用いたオープン故障回路の出力論理の固定化”, *LSI テスティングシンポジウム /2009*, p.233-238
 - (11) 眞田, 岸, 安富, “DSM に対する簡易な故障箇所候補特定方式－IDDQ 異常箇所候補と論理情報を用いた診断－”, *LSI テスティングシンポジウム /2010*, pp.181-186

Logic stabilization of open fault LSI by laser irradiation

Masaru Sanada, Taiki YASUTOMI

(Received : April 25th, 2011)

Faculty of Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502

E-mail: sanada.masaru@kochi-tech.ac.jp

Abstract: An experiment for stabilization of output logic brought by floating gate fault with unsuitable electric value has been executed. The method is the way to apply outside laser irradiation to Inverter circuit with gate open fault. The experimental result indicated that output value was stabilized to "H" level, and IDD value is simultaneously changed. This valuation value corresponds to operation point in normal IN-OUT characteristics. Another experiment which Laser was irradiated to one side of two Inverter circuits with common gate line showed to stabilize to the other side output value. We consider that gate voltage turned down by electron penetrated into gate line, the electron which is generated in PN junction with laser irradiation. This phenomenon is explained combining with single Transistor experiment.