

Self-Aligned Double Patterningのための 柔軟な2彩色配線法の提案

木村 優介^{1,a)} 佐藤 真平^{1,b)} 高橋 篤司^{1,c)}

概要：Self-Aligned Double Patterning (SADP) は、側壁スペーサープロセスを用いて微細なパターンを実現するが、SADP で実現できるパターンは2彩色可能なパターンに限られる。SADP で実現可能なパターンで配線を実現する様々な配線手法が提案されているが、配線の色を決めながら逐次的に配線を行う配線手法では、既配線の経路と決められた色の影響で、2彩色可能な配線パターンが得られないことがある。本稿では、配線の色を確定せず逐次的に配線を行うが、配線の色が既配線と同色となるか異色となるかを考慮しながら、できる限り2彩色可能性を失わない配線経路を選択することで、2彩色可能な配線パターンを得られる可能性を高める柔軟な2彩色配線手法を提案する。

Flexible Two-Colorable Routing for Self-Aligned Double Patterning

YUSUKE KIMURA^{1,a)} SHINPEI SATO^{1,b)} ATSUSHI TAKAHASHI^{1,c)}

Abstract: Self-Aligned Double Patterning (SADP) realizes fine pitch patterns by using sidewall process, but a pattern must be two-colorable. There are various routing methods for SADP in order to obtain a routing pattern that is two-colorable and that can be realized by SADP. However, a two-colorable routing pattern might not be obtained if a route is iteratively generated with color assignment. In this paper, we propose a flexible routing method for SADP. In our proposed method, a route is iteratively generated without color assignment, but two-colorability of routing pattern is maintained as much as possible during routing by taking the constraint on two-colorability into account, and the probability to obtain a two-colorable routing pattern is increased.

1. はじめに

ダブルパターニングは光リソグラフィの露光限界を超える微細な回路パターンを得るための重要な技術である。ダブルパターニングは主に Litho-Edge-Litho-Edge (LELE) と Self-Aligned Double Patterning (SADP) に分けられる。LELE は露光を2回行うことで微細な回路パターンを得る技術である [1][2][3]。しかし、1回目と2回目の露光でパターンにズレが生じるオーバーレイエラーの影響が大きい。SADP は1回の露光でウエハ上に芯材となるパターン

を実現した後に、側壁加工技術を用いることで微細な回路パターンを得る技術である。SADP は露光を1回しか行わないため、LELE で発生するオーバーレイエラーを起こさず、LELE よりも品質の高い回路パターンを得ることができる。

SADP では、ウエハ上でパターンは芯材の領域に生成されるパターンと、芯材の領域の周りに生成されるパターンの2種類に分けられ、それらはウエハ上で隣接しない。すべてのパターンは2種類のうち、そのいずれか一方の種類のパターンとして実現されなければならない。したがって、配線パターンは隣り合う配線が違う色となるように2彩色可能でなければならない。このような配線パターンを得るために、SADP のための配線パターン設計手法が研究されている [4][5][6][7][8][9]。

兎玉らは、必ず SADP で製造可能な配線パターンが得ら

¹ 東京工業大学 工学院情報通信系
Department of Information and Communications Engineering,
Tokyo Institute of Technology

a) kimura@eda.ce.titech.ac.jp

b) satos@ict.e.titech.ac.jp

c) atsushi@eda.ce.titech.ac.jp

れる, あらかじめ一部に色を塗った特殊な2色グリッドを用いた配線手法を示している [6]. しかし, この手法には端子の位置に制約がある. そこで, 井原らは兎玉らの手法を拡張し, 端子の位置の制約を緩和した修正2色グリッド手法を示している [7]. また, 三浦らは2色グリッドに準じた端子の位置に制約のない配線手法を提案している [8]. 他方, 中嶋らは, 2色グリッドに準じない配線法を提案している [9]. これらの配線手法は端子の位置に制約が無く, より多くの入力に対応可能である. しかし, 配線を行う前に色を決定するため, 既配線の経路と決められた色の影響で, 2彩色可能な配線パターンが得られないことがある.

本稿では, 配線の色を確定せず逐次的に配線を行うが, 配線の色が既配線と同色となるか異色となるかを考慮しながら, できる限り2彩色可能性を失わない配線経路を選択することで, 2彩色可能な配線パターンを得られる可能性を高める柔軟な2彩色配線手法を提案する. 配線の隣接関係を表す隣接グラフを用いると, 隣接グラフの連結成分の情報から, 配線の色が既配線と同色となるか異色となるかわかることがある. 他色となる配線にできるかぎり沿って配線し, 同色となる配線との隣接をできるかぎり避けることで, 2彩色可能な配線パターンを得られる可能性が高い. 提案手法では他色となる配線にできるかぎり沿って配線し, 同色となる配線との隣接をできるかぎり避けるようにコストを設定し配線経路を探索することで, 2彩色可能な配線パターンを得られる可能性を高める.

2. Self-Aligned Double Patterning (SADP)

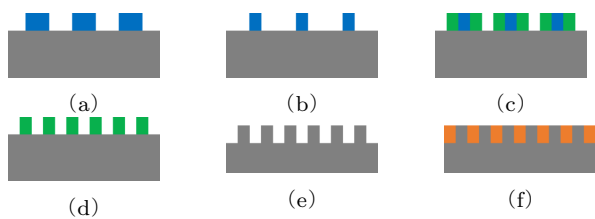


図1 SADPの製造プロセス. (a) 芯材形成. (b) スリミング. (c) 側壁材の堆積. (d) 芯材の除去. (e) エッチング. (f) 最終配線パターン.

Self-Aligned Double Patterning (SADP) は, 側壁加工技術を用いて, 光リソグラフィの限界を超えた微細なパターンを実現する技術である. SADPの製造プロセスを図2に示す. (a) まず, 光露光を用いて青色で示される芯材を形成する. (b) 次に, 芯材をスリミングすることで芯材の幅を半分にする. (c) そして, 幅を半分にした芯材の側面に緑色で示される側壁材を堆積させ, 側壁を形成する. (d) 最後に, 芯材を除去し, (e) 側壁を用いてエッチングを行うことで (f) オレンジ色で示される最終的な配線パターンを得る.

このプロセスは, 側壁を配線間のスペーサーとして用いるため, 側壁スペーサープロセスと呼ばれる. 配線は, スリミングした芯材があった領域と, 芯材も側壁もなかった領域に形成される. 前者の配線を一次配線, 後者の配線を二次配線と呼び, その両方を考慮して配線パターンの設計を行わなければならない. SADPの配線パターン設計において2種類の配線を区別するため, これらを赤の配線と青の配線とする. 芯材のマスクとして用いるパターンは赤の配線, 青の配線のどちらでも構わない.

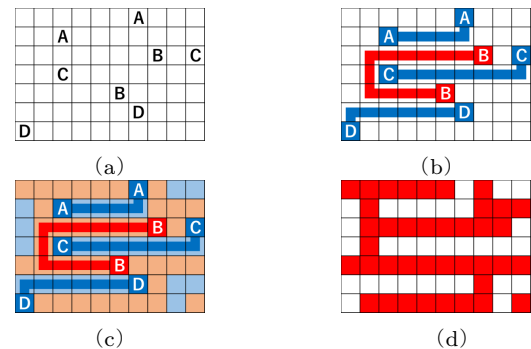


図2 SADPの芯材の決定. (a) 入力端子. (b) 2彩色配線. (c) ダミーパターン. (d) 芯材.

本稿では, 入力として, 複数のネットが与えられる. それぞれのネットは複数の端子を持ち, 端子の位置情報が与えられる. 位置情報は格子領域上に与えられ, 格子領域をグリッドと呼ぶ. また, グリッド上の格子をマスと呼ぶ. 以下の手順でSADPの芯材を実現する(図2). (a) 入力として端子の位置情報が与えられる. (b) ネットのすべての端子を赤または青で配線する. 異なるネットの配線は同じマスを經由してはならない. また, 異なる赤の配線は隣接するマスを經由してはならない. 同様に, 異なる青の配線は隣接するマスを經由してはならない. この条件を満たす配線パターンを2彩色配線と呼ぶ. (c) 配線パターンを生成した後に, 色が塗られていないマスに赤または青で色を塗る. ただし, 青配線に隣接するマスには赤を, 赤配線に隣接するマスには青を塗る. 青配線, 赤配線の両方に隣接しているグリッドはどちらかの色で塗る. ここで色が塗られたマスに対応して, ウエハ上に形成されるパターンをダミーパターンと呼ぶ. (d) 赤または青の一方を選択し, その色で塗られたマスを芯材のマスクとして用いる.

本稿では, 入力として端子の位置情報が与えられた際に2彩色配線を得る手法を提案する.

3. 関連手法

3.1 中嶋らの配線手法

中嶋らは, 前述の2色グリッドを使用しない配線法 [9] を提案した. この手法により, 入力に対しての制約がなく, 自由度の高い配線が可能となる. ネットを色分けがされていないグリッドで行うが, その途中で配線未使用のマスを

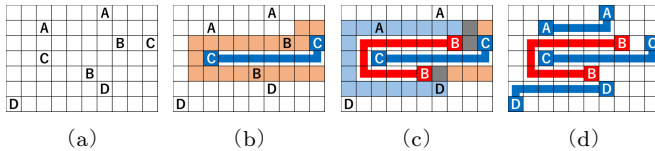


図 3 中罵手法における配線法. (a) 入力端子. (b) ネット A を青で配線. (c) ネット B を青で配線. (d) 最終パターン.

以下の 4 色で塗り分ける.

無色：初期状態のマスの色.

赤 (青)：青 (赤) で配線されたマスに隣接したマスの色. 赤 (青) でのみ配線することができる.

灰：赤で配線されたマス及び青で配線されたマスの両方に隣接するマスの色. 赤, 青のどちらの色でも配線することができない.

中罵手法における配線法は, まず任意のネットを赤 (青) で配線し, その周囲のマスが無色であれば青 (赤) に青 (赤) ならば灰に塗る. 赤 (青) で塗った未配線マス上に端子が存在する場合, その端子のネットを赤 (青) で配線し, 存在しない場合, 任意のネットを青または赤で配線する. この操作を繰り返す, すべてのネットの配線を行う (図 3 (a) - (d)).

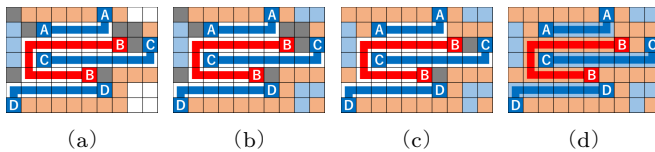


図 4 ダミーパターンの形成. (a) 最終配線パターンの周りのマスの塗り分け. (b) 同様にして, すべてのマスを赤, 青, 灰で塗り分け. (c) 灰色のマスを赤または青で塗り分け. (d) 最終ダミーパターン.

すべてのネットを配線した後, ネットを配線する際と同様に, ダミーパターンに隣接した無色マスの色を塗り分ける (図 4 (a) - (d)). 最後に, 残った灰色のマスを赤または青で塗り分ける事で, 芯材を決定する.

この手法は, 色を決定してから配線を行っているため, 2 彩色配線が得られない可能性がある.

3.2 2 色グリッド配線法

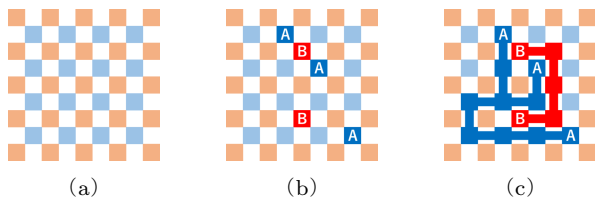


図 5 2 色グリッド配線法. (a) 2 色グリッド. (b) 入力端子. (c) 2 彩色配線.

児玉らは, あらかじめ一部を赤及び青で塗られた 2 色グリッド (図 5 (a)) を用いる 2 彩色配線法 [6] を提案した.

この手法によって, 配線が完了すれば SADP で製造可能である. しかし, 入力の端子位置について, 同じネットの端子はすべて同じ色のマス上に存在しなければならない (図 5 (b)), という制約がある.

この手法は, 制約が厳しく, 自由度に欠けるという問題点がある.

3.3 修正 2 色グリッド配線法

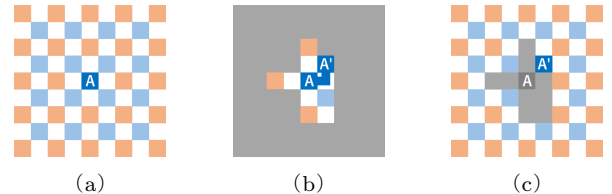


図 6 修正 2 色グリッド. (a) 2 色グリッド. 赤マス上に青端子がある場合の配線. (b) 配線禁止領域. (c) 経由端子を正規の端子とみなし, 配線領域を除く部分で配線.

井原らは, 児玉手法の制約を緩和する手法 [7] を提案した. この手法を用いることで, 2 色グリッドでの赤と青の端子の接続を可能とした.

赤と青の端子を接続する際, どちらかの色に決定しなければならない (図 6 (a)) ので, 周囲との不具合を起こさぬよう, 色を塗り替えるマスに隣接するマスのうち 1 つに経由ピンを設定し, 塗り替えるマスと経由ピンを接続する. また, その配線の周囲に影響範囲 (図 6 (b)) とし, 他の配線の利用を禁じる (図 6 (c)). 禁止領域外での配線は児玉らの手法に習う. これにより, 影響範囲外の端子は児玉手法と同じ手順で配線することができる.

この手法は, 児玉手法よりも入力の制約が緩和されているが, 影響範囲が大きいので, 密な入力に対応できず, 限界がある.

4. 提案手法

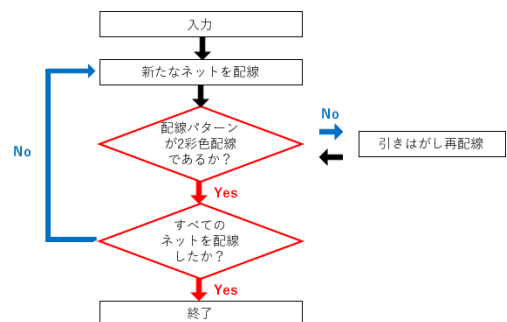


図 7 提案手法のフローチャート

本稿では入力として端子情報が与えられた際に, ネットの端子同士を 2 彩色配線したパターンを出力する配線手法を提案する. 入力で与えられた端子の位置は変更しないものとする. また, ネットの端子の隣接関係の影響で配線を

行う前から 2 彩色配線が不可能な入力と考えない。

提案手法のフローチャートを図 7 に示す。提案手法では逐次的にネットを配線し、2 彩色配線可能であるかどうかを確認する。2 彩色配線が可能である場合には次のネットを配線し、2 彩色配線が不可能である場合には引きはがし再配線を行う。

4.1 配線パターンと隣接グラフ

4.1.1 隣接グラフの 2 彩色

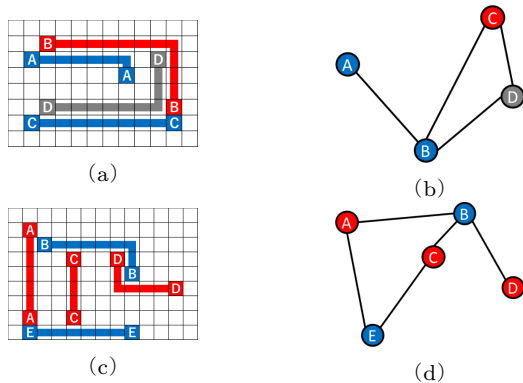


図 8 配線パターンと隣接グラフ (a) 配線パターン 1 (2 彩色不可能). (b) 配線パターン 1 の隣接グラフ (c) 配線パターン 2 (2 彩色可能). (d) 配線パターン 2 の隣接グラフ.

配線が 2 彩色可能であるかを判定するために、本手法では隣接グラフを用いる。ネットを点とし、ネットの配線がグリッド上で 1 マスでも隣接している場合、対応する点間に辺を繋ぐ。2 彩色配線では、辺の両端点に対応する配線は異なる色で塗られる。図 8 (a), (c) の配線パターンの隣接グラフをそれぞれ図 8 (b), (d) に示す。

グラフに奇閉路があればグラフの点は 2 彩色不可能であり、奇閉路がなければ 2 彩色可能である。隣接グラフに奇閉路があれば配線パターンは 2 彩色配線不可能であり、奇閉路が無ければ 2 彩色配線可能である。図 8 (a) に示す配線パターン 1 は図 8 (b) に示す隣接グラフに奇閉路 (B,C,D) が存在し、2 彩色不可能である。よって、配線パターン 1 は 2 彩色配線不可能である。また、図 8 (c) に示す配線パターン 2 は図 8 (d) に示す隣接グラフに奇閉路が存在せず、2 彩色可能である。よって、配線パターン 2 は 2 彩色配線可能である。

グラフに奇閉路が存在しない場合、同じ連結成分内に含まれるすべての点は、グラフの 2 彩色において、1 つでも点の色が決定すれば色が決定する。ある点の色が決定した場合、その点からの距離が奇数である点はその点と異なる色、その点からの距離が偶数である場合はその点と同色となる。一方、その点と同じ連結成分内に含まれないすべての点は、色が決定しない。

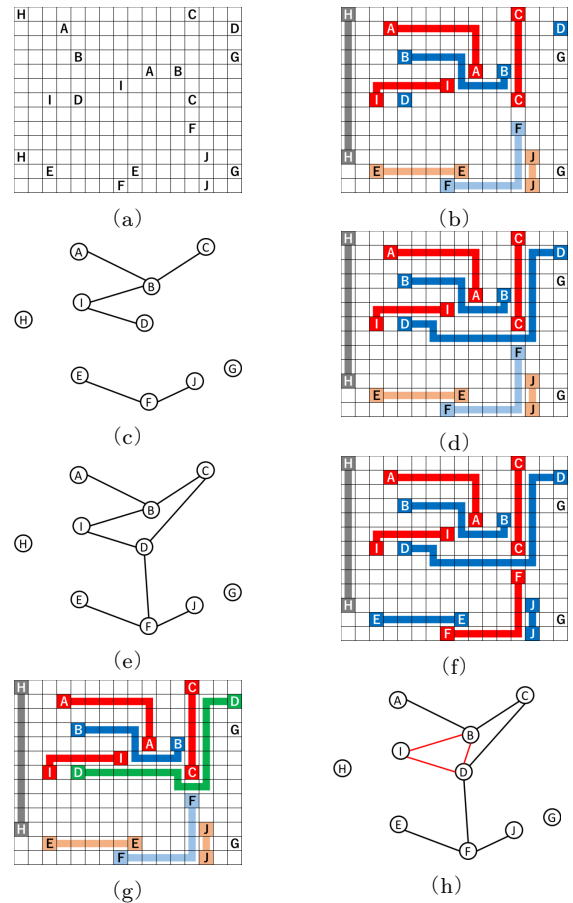


図 9 隣接グラフを用いた隣接関係. (a) 入力端子. (b) 配線パターン 1. (c) 配線パターン 1 の隣接グラフ. (d) 配線パターン 2. (e) 配線パターン 2 の隣接グラフ. (f) 連結成分を考慮し、色を塗り分けた配線パターン 2. (g) 配線パターン 3 (h) 配線パターン 3 の隣接グラフ.

4.1.2 隣接グラフの更新

図 9 (a) に 10 ネットからなる配線問題の入力を示す。

図 9 (b) に 8 ネット (A, B, C, E, F, J, H, I) の配線パターン 1, 図 9 (c) にその隣接グラフを示す。隣接グラフには奇閉路は存在しない。ネット D の配線はまだ行われていないが、ネット D の端子がネット I の配線と隣接しているため点 D と点 I 間に辺が存在する。2 点以上から成る隣接グラフの連結成分は、(A, B, C, D, I) 及び (E, F, J) である。図 9 (b) ではこれら連結成分に属す配線を赤、青で塗り分けている。図 9 (b) で、濃い赤、濃い青で塗られた配線は同じ連結成分内の点に対応し、同様に、薄い赤、薄い青で塗られた配線も同じ連結成分内の点に対応する。しかし、濃い色で塗られた配線と薄い色で塗られた配線は同一の連結成分に属さない。つまり、濃い赤で塗られたネット C の配線とネット A の配線は同色で塗らなければならないが、ネット C の配線の色は薄い赤で塗られるネット E の配線の色に影響を及ぼさない。

配線パターン 1 にネット D の配線を加えた配線パターン 2 を図 9 (d) に、隣接グラフを図 9 (e) に示す。配線パターン 2 では、配線パターン 1 では異なる連結成分であっ

た (A, B, C, D, I) と (E, F, J) が一つの連結成分となる。つまり、ネット D を配線したことで、ネット C の配線の色はネット E の配線と異なる色で塗らなければならない (図 9(f))。

同様に、配線パターン 1 にネット D の配線を加えた配線パターン 3 を図 9 (g) に、隣接グラフを図 9 (h) に示す。この隣接グラフには奇閉路 B, D, I が存在するため、配線パターンを 2 彩色配線することは不可能である。これは、ネット D の配線が、配線パターン 1 で既に同じ連結成分に属し、異なる色で塗らなければならないネット B とネット I の両方の配線に隣接したためである。

4.2 配線経路探索

本手法では、入力としてネットの端子の位置情報与えられたとき、配線長が小さい 2 彩色配線を得ることを目的とする。提案手法では、グリッドのマスにコストを設定し、端子間の最小コストパスを求めることを繰り返し、配線を生成する。経由をさせたいマスのコストを低下させ、そのマスを経由しやすくする。同様に、経由を避けたいマスのコストを増加させ、そのマスの経由をしにくくする。コストを設定することで、最小コストパスで経路探索をした際に、より適切な配線経路を選択することができる。提案手法では、配線を行う際、以下のコストを設定する。

配線長コスト

C_{initial} : 端子が置かれていないマスの配線長に比例するコスト。配線長削減のため。

C_{pin} : 端子が置かれたマスのコストで無限大。他ネットの端子上は配線できないため。

重なり防止コスト

C_{route} : 既配線上のマスのコスト。既配線为了避免のため。

奇閉路防止コスト

C_{difColor} : 配線を行うネットと異なる色のネットの配線に隣接するマスのコスト。異色の配線に沿って配線を行うため。

$C_{\text{sameColor}}$: 配線を行うネットと同じ色のネットの配線に隣接するマスのコスト。同色の配線と隣接するのを避けるため。

C_{purple} : 両方の色の配線に隣接するマスのコスト。奇閉路の発生を避けるため。

引きはがし再配線コスト

C_{overlay} : 引きはがした配線と他配線が重なっていたマスのコスト。再配線時に同一の経路を避けるため。

C_{green} : 引きはがした配線と隣接グラフの奇閉路上で隣接していた配線の周りのマスに隣接するマスのコスト。再配線時に同一の経路を避けるため。

図 9 (b) において、D の配線を行う状況を考える。 C_{initial} , C_{pin} , C_{route} は隣接グラフによらず設定するコストである。

接続しているネット以外の端子上は配線することができないので、 C_{pin} のコストは無限大となる。

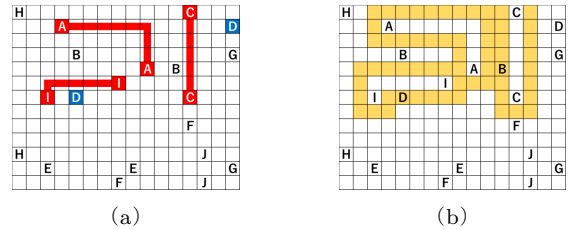


図 10 (a) ネット D と異なる色の配線. (b) C_{difColor} の適用マス。

C_{difColor} は、配線を行うネットからの、隣接グラフにおける距離が奇数であるネットの配線に隣接するマスで減少させるコストである。ネット D と同じ連結成分に属し、距離が奇数となるネットは A, C, I となる (図 10 (a))。これらの配線パターンの周りのマスを、図 10 (b) で黄色で示す。ある黄色いマスに隣接するマスを配線が経由すると、その黄色いマスが赤、青の 2 色ともに隣接するマスになる。このとき 2 彩色配線では、その黄色マスを配線に用いることは不可能である。よって、これらの黄色いマスはなるべく通りたいので、黄色いマスのコストを減少させる (図 10 (b))。

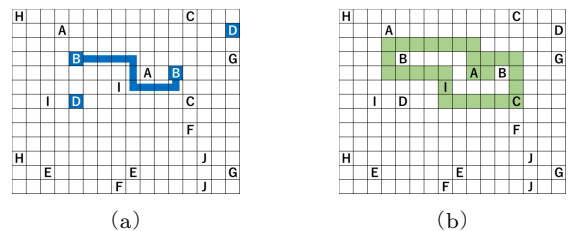


図 11 (a) ネット D と同色となる配線. (b) $C_{\text{sameColor}}$ の適用マス。

$C_{\text{sameColor}}$ は、配線を行うネットからの、隣接グラフの距離が偶数となるネットの配線に隣接するマス増加させるコストである。ネット D と同じ連結成分に属し、隣接グラフの距離が偶数となるネットは B である (図 11 (a))。隣接グラフの距離が偶数となるネットは彩色をした際に同色となるので、これらの配線パターンに沿って配線を行うと 2 彩色が不可能となる。これらの配線パターンとの隣接を避けるために、図 11 (b) で緑色で示されるマスの経由を避けたい。よって、それらのマスのコストを増加させる (図 11 (b))。

隣接グラフの連結成分で、距離が奇数の点は 2 彩色において異なる色になる。 C_{purple} は両方の色の配線に隣接するマスのコストである。配線を行うネット D の端子を除き、異なる色の配線に隣接するマスを図 12 (a) に示す。これらのマスは経由することで隣接グラフに奇閉路が発生してしまい、2 彩色配線が不可能となる。よってこれらのマス (図 12 (b)) の経由を避けたいので、コストを増加させる。

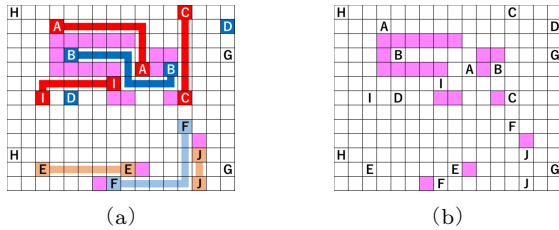


図 12 (a) 経路すると 2 彩色不可能となるマス. (b) C_{purple} の適用マス.

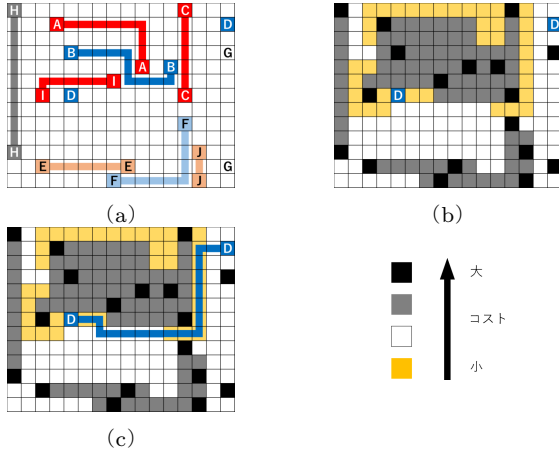


図 13 配線経路探索. (a) 現在の配線状況. (b) 適用されるコスト. (c) D のネットを配線.

4.2.1 経路探索

以上のコストを適応したとき、図 13 (a) の状況下で、D の配線経路を探索する場合、マスに適用されるコストの大きさを図 13 (b) に示す。このときの最小コスト経路を図 13 (c) に示す。

4.2.2 引きはがし配線

配線が重なる、または隣接グラフに奇閉路が生じた際に、それらの問題を引き起こしているネットの配線を引きはがし、再配線を行う。 C_{overlay} 、 C_{green} は引きはがし再配線を行う際、増加させるコストである。引きはがし再配線を行う際に、引きはがし再配線を行う原因となってしまったマスにコストを設定することで、引きはがし再配線をした際に同様の配線が得られるのを防ぐ。 C_{overlay} は配線を引きはがす前に、重なったマスについて増加させるコストである。これにより、再配線を行う際、配線同士の重複を避ける。 C_{green} は配線を引きはがす前に奇閉路が生じた場合に、奇閉路の一边を選択し、その辺の両点のネットが隣接しているマスに増加させるコストである。これにより、再配線を行う際、奇閉路を生じ辛くなる。

4.3 ダミーパターンの割り当て

ダミーパターンの割り当ては既存の手法 [9] に習う。ダミーパターンを決定する前に、隣接グラフの連結成分を用いてすべてのネットの配線を赤、青で塗り分ける (図 14 (a))。次に、赤で塗り分けた配線の周りのマスを青で、青で塗り分けた配線の周りを赤で、両方に接しているマスは

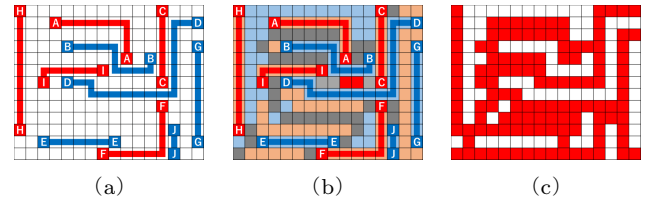


図 14 ダミーパターン配置. (a) 最終配線パターン. (b) 赤、青、灰で塗り分け (c) マスク

グレーで塗り分ける。グリッド上が全て赤、青、グレーで塗り分けられるまでこの作業を繰り返す (図 14 (b))。グレーのマスを赤または青で塗り分け、塗り分けた色のマスを芯材のマスクとする (図 14 (c))。

5. まとめ

本稿では、入力に対しての制約を無くし、隣接関係の隣接グラフを用いる配線手法を提案した。入力に対しての制約がなくなることにより自由度の高い配線が可能となった。また、色を決定してから配線せず、隣接グラフを用いた連結成分から 2 彩色可能であるかどうかを判断することにより柔軟な配線が可能となった。今後の課題として、計算機実験での配線法の評価が挙げられる。

参考文献

- [1] K. Yuan, J.S. Yang and D.Z. Pan, "Double Patterning Layout Decomposition for Simultaneous Conflict and Stitch Minimization," IEEE Trans. on CAD, 29, pp.185–196, 2010.
- [2] A.B. Kahng, C.H. Park, X. Xu and H. Yao, "Layout Decomposition Approach for Double Patterning Lithography," IEEE Trans. on CAD, 29, pp.939–952, 2010.
- [3] C.H. Hsu, Y.W. Chang and S.R. Nassif, "Simultaneous Layout Migration and Decomposition for Double Patterning Technology," IEEE Trans. on CAD, 30, pp.284–294, 2011.
- [4] Y. Ban, K. Lucas and D.Z. Pan, "Flexible 2D Layout Decomposition Framework for Spacer-Type Double Patterning Lithography," Proc. DAC'11, pp.789–794, 2011.
- [5] Z. Xiao, Y. Du, H. Zhang and M.D.F. Wong, "A Polynomial Time Exact Algorithm for Self-Aligned Double Patterning Layout Decomposition," Proc. ISPD'12, pp.17–24, 2012.
- [6] C. Kodama, H. Ichikawa, K. Nakayama, T. Kotani, S. Nojima, S. Mimotogi, S. Miyamoto, and A. Takahashi, "Self-Aligned Double and Quadruple Patterning-Aware Grid Routing with Hotspots Control," Proc. ASP-DAC'13, pp.267–272, 2013.
- [7] T. Ihara, A. Takahashi, and C. Kodama, "Rip-up and Reroute based Routing Algorithm for Self-Aligned Double Patterning," Proc. SASIMI 2015, pp.83–88, 2015.
- [8] 三浦彦彦, 長谷川充, 比留川拓, 藤吉邦洋, "側壁ダブルパターニングのための 2 色グリッドに準じた配線手法," 信学技報, 116(21), pp.5–10, 2016
- [9] F. Nakajima, C. Kodama, H. Ichikawa, K. Nakayama, S. Nojima, T. Kotani, S. Mimotogi and S. Miyamoto, "Detailed Routing with Advanced Flexibility and in Compliance with Self-Aligned Double Patterning Constraints," Proc. SPIE Vol.8684 86840A, pp.1–10, 2013.