Add-Drop Filter Based on Mach-Zehnder Interferometer with Bragg Gratings

に関するアプリケーションノート

計算機による設計とシミュレーション

APN-APSS-MZICircuit

Apollo Inc.
1057 Main Street West
Hamilton, Ontario L8S 1B7
Canada
Tel: (905)-524-3030
Fax: (905)-524-3050

www.apollophotonics.com

(有)ノア　コンサルティング
〒709-0854 岡山県赤磐郡瀬戸町江尻 1607 番地
Tel: (0869)-52-5288
Fax: (0869)-52-5278
E-mail：info@noah-c.com

www.noah-c.com

Disclaimer

In no event should Apollo Inc., its employees, its contractors, or the authors of this documentation be liable to you for general, special, direct, indirect, incidental or consequential damages, losses, costs, charges, claims, demands, or claim for lost profits, fees, or expenses of any nature or kind.

Document Revision: June 15, 2003
日本語版:2004 年 1 月 16 日（加筆修正）

Copyright © 2003 Apollo Inc.

All right reserved. No part of this document may be reproduced, modified or redistributed in any form or by whatever means without prior written approval of Apollo Inc.

日本語版は Apollo 社の了解のもとに(有)ノア　コンサルティング技術スタッフが日本語ユーザのために用意したものであり、許可なく複製、修正並びに再配布をすることはできません。

概要

このアプリケーションノートは APSS を用いてブラッグ格子のあるマッハツェンダー干渉計を用いて光の合分波フィルタの設計、シミュレーション、レイアウトについて記したものである。

本資料には以下の事柄が記載されている。

- 動作原理の記述
- バンド幅、サイドローブ、クロストークなど合分波器設計に影響を及ぼすキーとなる事柄の記述
- APSS の回路モジュール(CM)が複雑なコンポーネントを、効率よくしかも精度良くシミュレーションするために、いかに論理的にサブコンポーネントに分けるかの記述
- マスクレイアウトとファイルエキスポートに関する記述

Keywords
APSS、マッハツェンダー干渉計(MZI)、ブラッグ格子、回路モジュール (CM)、波長分割多重(WDM)、リング共振器、自由スペクトル領域、フィネス

目次

1 はじめに 5

2 理論 6

2.1 動作原理 6
2.2 中心波長 7
2.3 バンド幅 7
2.4 サイドローブ 8
2.5 クロストーク 8

3 設計とシミュレーション 9

3.1 全体設計 9
3.2 導波路設計 9
3.3 2×2 3 dB カップラの設計 10
3.4 ブラッグ格子の設計 12
3.5 回路設計 15
3.5.1 レイアウト 15
3.5.2 コネクタ 16
3.5.3 解法設定 16
3.5.4 シミュレーション結果 17
3.5.5 プロジェクトのエキスポートとファイル 18

4 議論 19

5 まとめ 20

6 参考文献 20

1 はじめに

光合分波の波長フィルタは波長多重(WDM)光通信システムのキー部品である。集積化された合分波フィルタの一つとして、アームの両方にブラッグ格子がついている導波路型のマッハツェンダー干渉計(MZI)を使ったものがある。この方法は最初ファイバグレーティングで実証[1]され、その後 PLC で製作されるようになった[2]。

モデル化の観点からは、ビーム伝搬法(BPM)や時間領域有限差分法(FDTD)などの数値解析手法を用いてこの種のフィルタの構造をシミュレーションすることは挑戦的な事柄である。グレーティングがあるので BPM では反射を扱うことができないので使えない。一方、FDTD は構造全体をシミュレーションしようとすればメモリと計算時間の点から無理である。

しかし、APSS 回路モジュール (APSS-CM)を使うと、設計者はこの複雑な構造をブラッグ格子を有する MZI のように論理的ないくつかのサブコンポーネントに分けることができる。 これらの分割されたサブコンポーネントはデバイスモジュール(APSS-DM)を使って最もふさわしい方法でシミュレーションすることが可能である。そして、最後に APSS-CM(回路モジュール)を用いてデバイスモジュールの結果を集めて集積回路としてシミュレーションを行う。もう一つの利点は、回路解析のときには、それぞれのサブコンポーネントは何度繰り返し使用しても、その計算は再び繰り返される必要は無い。

この資料で実例として用いたデバイスは 3 dB カップラと数周期の非常に短いブラッグ格子が大きな複雑な集積回路を構成するためにリンクされているものである。

2 理論

2.1 動作原理

中央の波長はブラッグ格子によって決まり、ブラッグ波長と呼ばれる。図１に示すように、ターミナル１から多重化された波長が入力され、同じグレーティングを持っている２つのアームに等しく分かれる。一つの波長はグレーティングのブラッグ波長であり、その波長は反射され、それ以外の波長は通過する。両方のアームからの反射した波長は一緒になってターミナル２からドロップ波長として出射する。通過波長は多重化されてターミナル３から出射される。

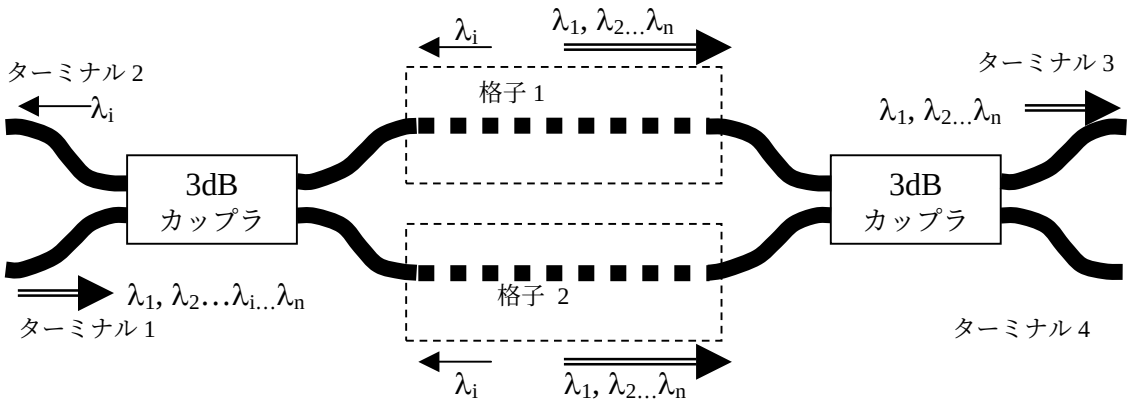


図１、ブラッグ格子を持つアッド/ドロップ MZI フィルタのドロップ機構

同様に、図２に示すようにターミナル４からブラッグ波長を入力すると、２つのアームの回折格子で反射し、アッド波長として他の波長と合波してターミナル ３から出射する。

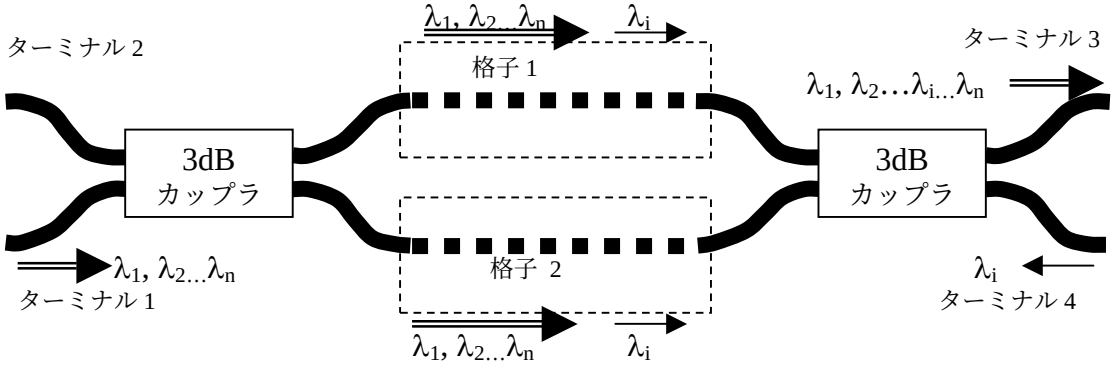


図２．ブラッグ格子を持つアッド/ドロップ MZI フィルタのアッド機構

2.2 中心波長

前節で述べたように中心波長、即ちブラッグ波長はブラッグ格子の周期で決まる。

$$\lambda_i = \frac{\Lambda}{2n_{eff}} \tag{1}$$

ここで、n_{eff} は導波モードの実効屈折率であり、通常は基本モードである。従って、ブラッグ波長をλ_i にしようとすれば回折格子の周期は式(2)となる。

$$\Lambda = \frac{\lambda_i}{2n_{eff}} \tag{2}$$

2.3 バンド幅

反射スペクトルのバンド幅はグレーティング長さとグレーティング強度によって決まる。[3].

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_i} = \sqrt{\left(\frac{\delta n_{eff}}{n_{eff}}\right)^2 + \left(\frac{2\Lambda}{L}\right)^2} \tag{3}$$

ここで、δn_{eff} はグレーティングを導入することによって生じる実効屈折率変化分であり、 L はグレーティングの長さである。

弱いグレーティングでは、δn_{eff} は大変小さな値であり、式(3)右辺のルートの第１項は第２項に比べて無視できる。従って、バンド幅は次のように簡単化される。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_i} = \frac{2\Lambda}{L} = \frac{2}{N} \tag{4}$$

ここで、N はグレーティング数である。従って、スペクトラムはグレーティング長の逆数に比例する。

強いグレーティングでは第１項は第２項よりも大きくなり、バンド幅は次のように簡単化される。

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_i} = \frac{\delta n_{eff}}{n_{eff}} \tag{5}$$

この場合には、グレーティングの長さはスペクトラムには大きな影響は与えない。このことは、信号は最初の幾つかのグレーティングで完全に反射されるので、残りのグレーティングは大した影響を与えないと考えられる。このような訳で、設計では結合強度とグレーティングの長さのバランスを取ることが重要である。良い設計では、グレーティング方向に反射が均一に生じる。そして、全てのパワー（またはパワーの何パーセントか）が反射される。

2.4 サイドローブ

スペクトルの観点では、均一に分布した回折格子はサイドローブが大きくなるので、理想的な解を与えるものではないかもしれない。サイドローブが大きいと波長間でクロストークが起こり易くなる。この欠点を補うには、両端で結合が弱く、中央で強くなるように導波路方向にグレーティング強度を変えたグレーティングのアポダイゼーションを使う。実際には、サイドローブとメインローブのレベルはアポダイゼーションプロファイルに強く依存する。従って、与えられたバンド幅で所望のレベルのサイドローブ特性を得るにはアポダイゼーション関数の最適化が必要である[4]。

2.5 クロストーク

MZI アッド/ドロップフィルタには幾つかのタイプのクロストークがある。それらを以下に記す。

- 波長またはスペクトルのクロストーク– 通過信号の一部分が反射することに起因するものは前述のアポダイゼーションによってサイドローブを減少させることができる。

- 空間的クロストーク– 一部が反射したり透過したりする信号が間違ったターミナルで一緒になることによって生じるクロストークである。このことで不均一な 3dB カップラとなったり２つのアームへの配分が不均一となる。空間的なクロストークは製造上のエラーによるもので、製造のトレランスを制御することで低下させることができる。きっちりと設計することで製造によるばらつきで生じるクロストークを低減させることが可能である。

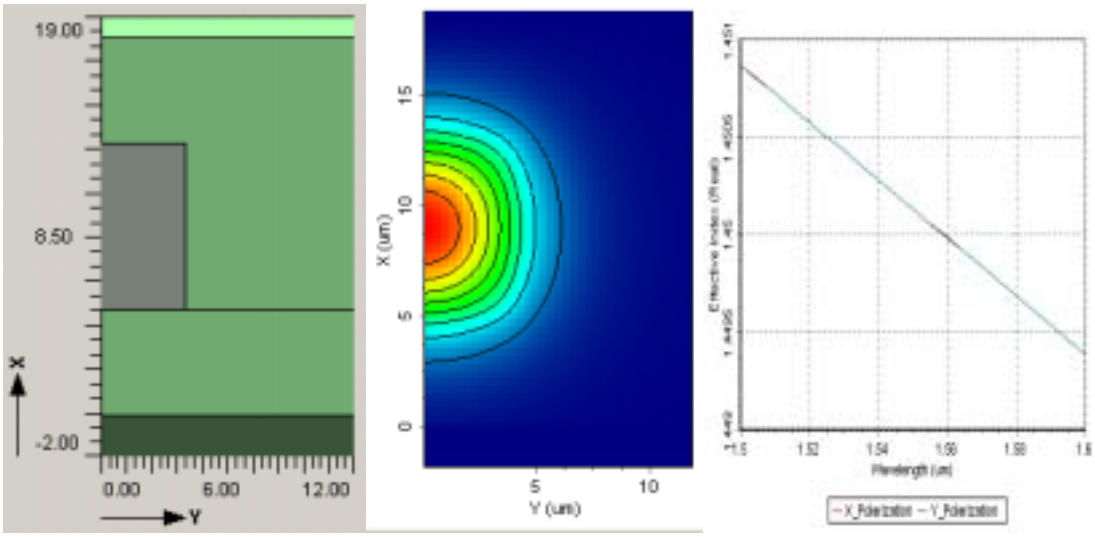
3 設計とシミュレーション

3.1 全体設計

参考文献[2]に記されているように、低挿入損、偏波無依存のアッド/ドロップフィルタの設計が目標である。デバイスサイズはおおよそ、0.5 × 10 mm^2 である。回路モジュール(APSS-CM)により、MZI アッド/ドロップフィルタは２つの 3 dB カップラ(2×2 MMI から成る)と短いブラッグ格子に分解される。FDTD は反射を考慮できるので、回折格子のシミュレーションに用いられる。他方、BPM またはモードマッチング法 (MMM) は MMI のシミュレーションに用いることができる。回路モジュールの中で何度もそれらのデバイスが用いられようとも、APSS のデバイスモジュールでの解析は１回で良く、２種類のデバイス–2 × 2 MMI と短いブラッグ格子である。

3.2 導波路設計

図３(a)に示すように 8μm×8μm のシリコン上のシリカのチャンネル導波路プロジェクトが定義されている。ここでは、２つ材料プロジェクトとして、シリカと Ge をドーピングしたシリカ、またユーザ定義の材料としてシリコンが利用されている。構造の対称性を利用して、半分の構造だけ解析すれば良い。



(a)構造 **(b) モードプロファイル** **(c)実効屈折率特性**

図３．MZI アッド/ドロップフィルタ用導波路プロジェクト

図３(b)に計算結果のモードプロファイルを示す。また、X-および Y-方向の偏波に対する実効屈折率の計算値を図３(c)に示す。X-および Y-方向の偏波に差が無いので偏波依存性は無いことがわかる。

精度の高い解を得るには、正しいメッシュ配置をしなければならない。メッシュが誘電体の境界と一致するように、また両方向で同じサイズになるように、この問題の場合には 63 × 36 を用いた。詳しくは、APSS フォルダーの “APSS-Getting Started”の導波路の項目を参照されたい。

3.3　2×2 3 dB カップラの設計

MMI はパワーを等分配するには、広帯域特性、低偏波依存、低挿入損などの関係から理想的なカップラである。図４は APSS の導波路プロジェクトを利用して作成したデバイスプロジェクトでの結果である。幾何学的パラメータは幾何学タブ”Geometry tab”に記されている。

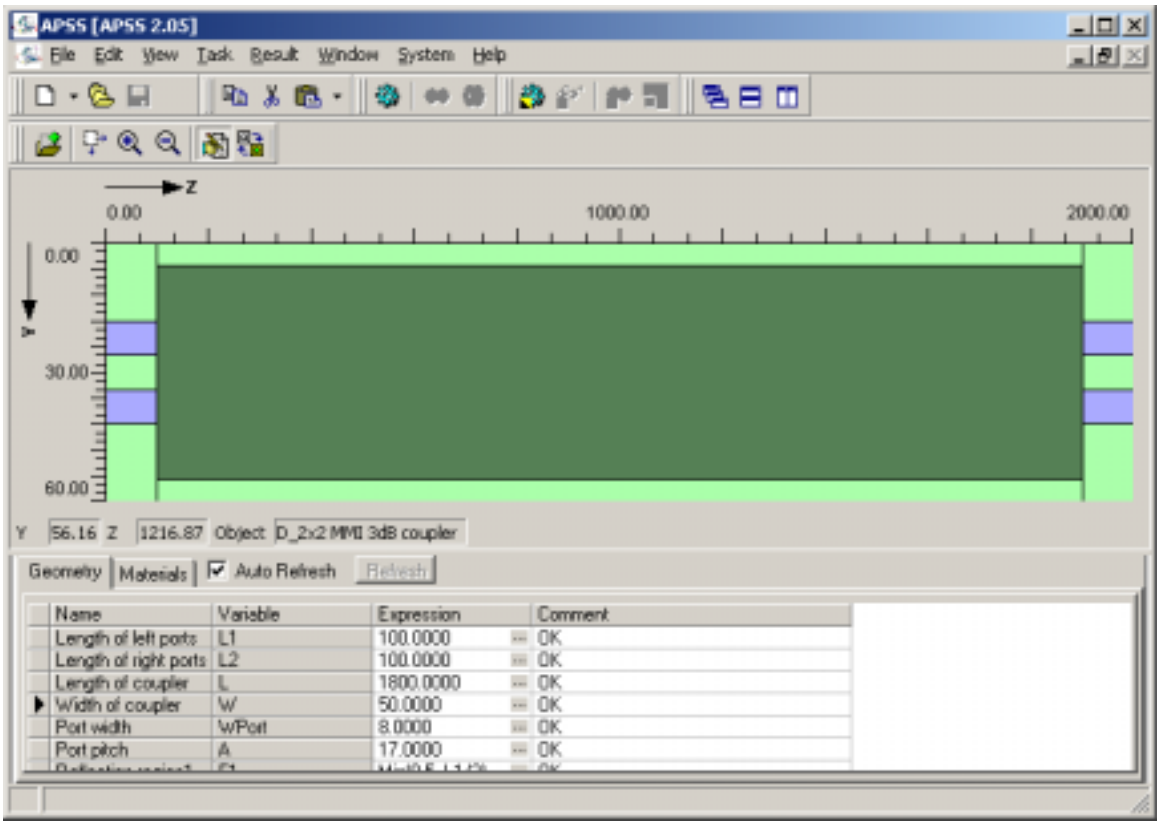


図４．2×2 MMI のデバイスプロジェクト

APSS の特長の一つに設計者に幾つかの異なったデバイスシミュレーションの方法を提供し、その中から柔軟に選択ができる点である。以下に選択肢を記す。

- モードマッチング法(MMM)の２次元解析
- ２次元 BPM
- ２次元 BPM+２次元 FDTD
- ３次元セミベクトル BPM
- ３次元セミベクトル BPM + ３次元セミベクトル FDTD
- ３次元フルベクトル BPM
- ３次元フルベクトル BPM + ３次元フルベクトル FDTD

導波路は垂直方向と水平方向の両方向でほぼ対称であるので、等価屈折率法(EIM)が十分に正確である。従って、２次元解析までで十分な精度が得られる。また、接合では屈折率変化が小さいので、そこでの反射は極めて小さい。従って、

FDTD 計算は不要であり、この種のデバイス解析には、２次元解析手法または BPM で十分である。

図５は２次元 BPM での 2×2 MMI のスペクトル特性である。パワーの分配はほぼ等しく行われ、偏波依存性は極めて小さいことがわかる。

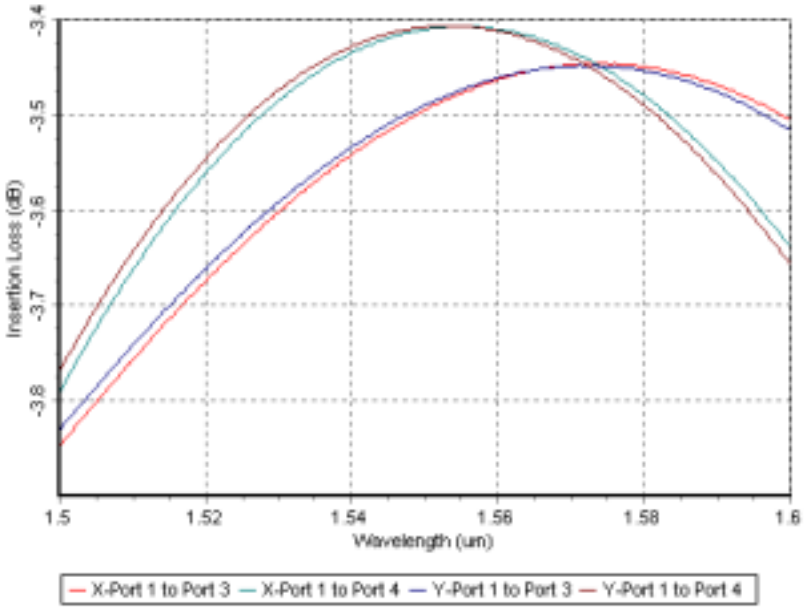


図５．方向性結合器の挿入損のスペクトル特性

3.4　ブラッグ格子の設計

現バージョンの APSS デバイスモジュールにはブラッグ回折格子のテンプレートは用意されていないので、ユーザ定義でプロジェクトを作成する。この際に、回折格子の周期、高さ、数、導波路幅などを変数定義としておき、後で数値を与える。

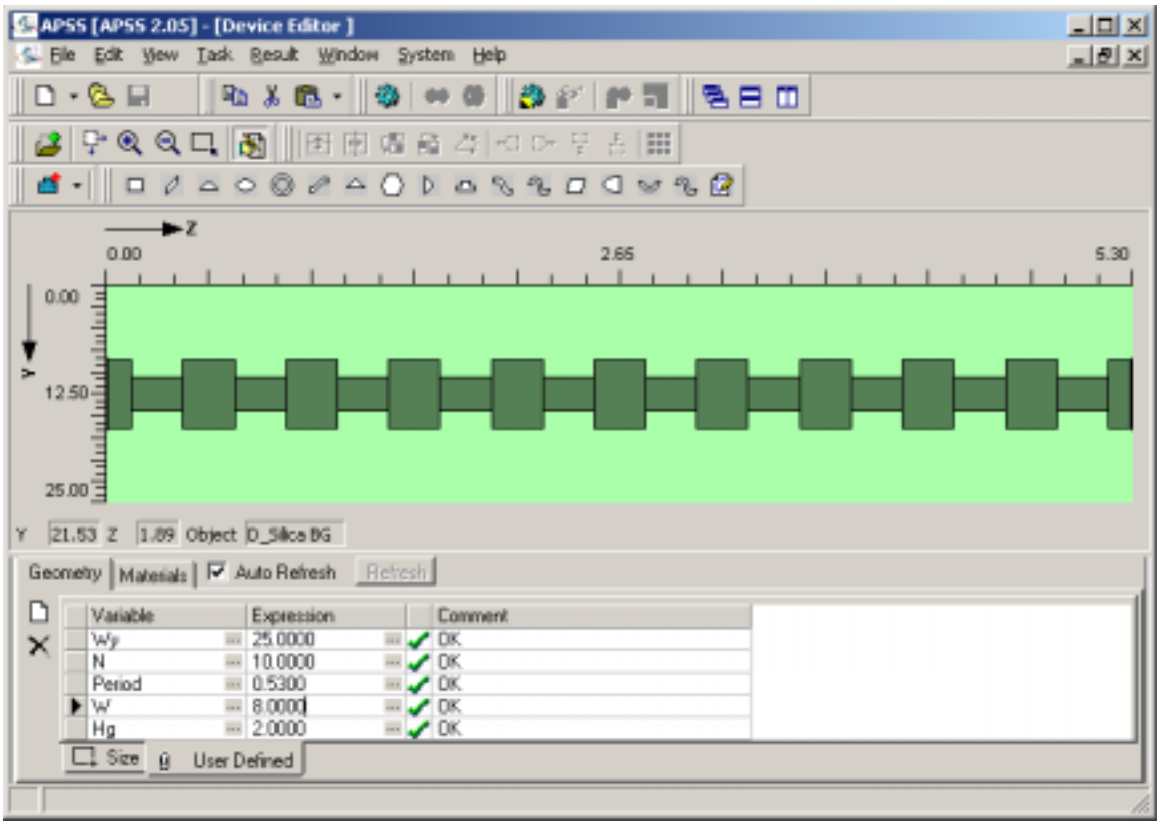
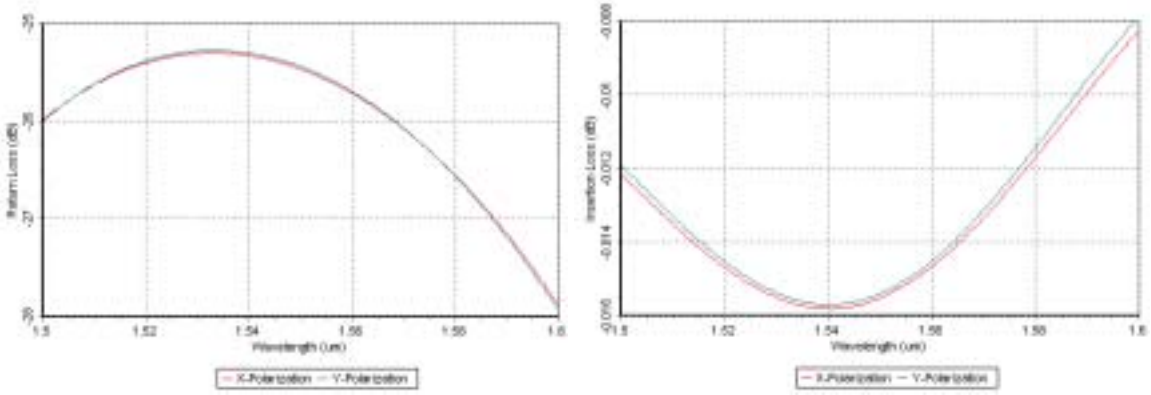


図６．短いブラッグ格子のデバイスプロジェクト

参考文献[2]で用いられている、紫外線照射による体積効果での回折格子の代わりに、MZI と同じマスクで製造可能な幅を変えたサイド型回折格子が用いられた。この手法は、紫外線照射のために追加の位相マスクを必要としない。結合強度は回折格子の高さ H_g で変化でき、最大強度は H_g=W/2 である。

既に述べたように、短い回折格子の設計とシミュレーションが必要である。一旦設計されると、長い回折格子は、短い回折格子の縦続接続で実現できる。回折格子のディューティサイクルを 0.5(山と谷を半分づつ)とする。短い回折格子の接続点での位相シフトが無いとすれば、図６に示すように短い回折格子の両端の部分は 1/4 周期となる。従って、それを接続すると接続点で回折格子は 1/2 周期となり連続して見える。

図７はグレーティング高さを 4μm としたとき（最大高さ）の反射と透過のスペクトル特性である。図に示したように、挿入損、偏波依存性は極めて小さいことがわかる。

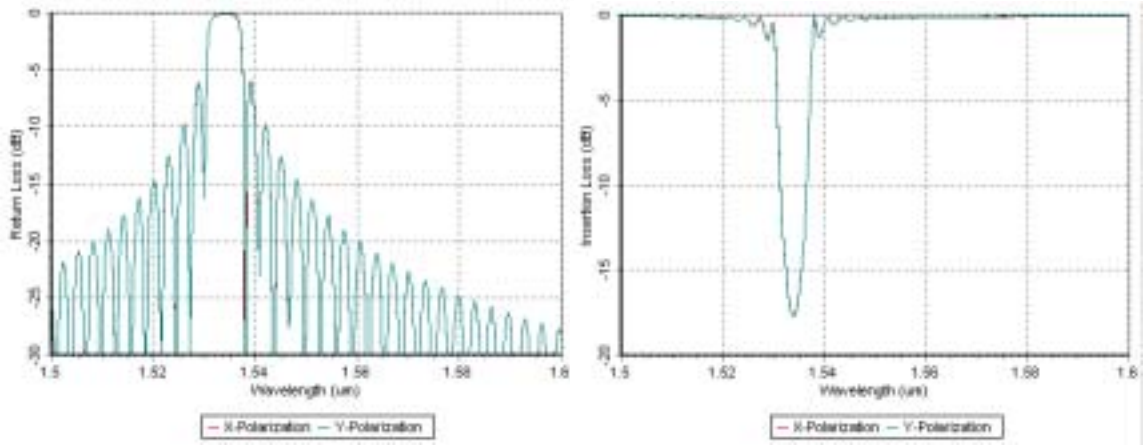


(a) 反射　　**(b) 透過**

図７．短いブラッグ格子のスペクトル

正確な結果を得るにはメッシュの設定は正しくなければならない。Z 方向については 1/2 や 1/4 周期の両端がメッシュに一致するように配置しなければならない。同様なルールは Y 方向も同じである。最後に、シミュレーションでは入力光を時間に依存した取り扱いをするため、回折格子の両端の間には 4 つ以上のメッシュがなければならない。

図８は 50 個の短い回折格子を組み合わせた 265μm 長の回折格子のスペクトル特性である。3dB のバンド幅は約 6nm である。反射ピークは約–0.1dB で、透過ノッチは約-18dB である。



(a) 反射 **(b) 透過**

図８．50 個の短い回折格子を縦続接続した構造のスペクトル特性

3.5 回路設計

3.5.1 レイアウト

APSS の回路プロジェクトを図９に示す。図に示すように、50 個の短い回折格子から成る長いペアの回折格子が 2×2 の 3dB カップラにそれぞれの側で接続されている。コンポーネントとして完成した後にはファイバ接続の余裕が無ければならない。したがって、２つの入出力ポートには 250μm 間隔がなければならない。カップラ間にある調節アームは相互作用しないように 50μm としている。S 字曲がりのオフセット/長さの比は、曲がり損が無視できる程度に小さくできる 1/20 としている。.

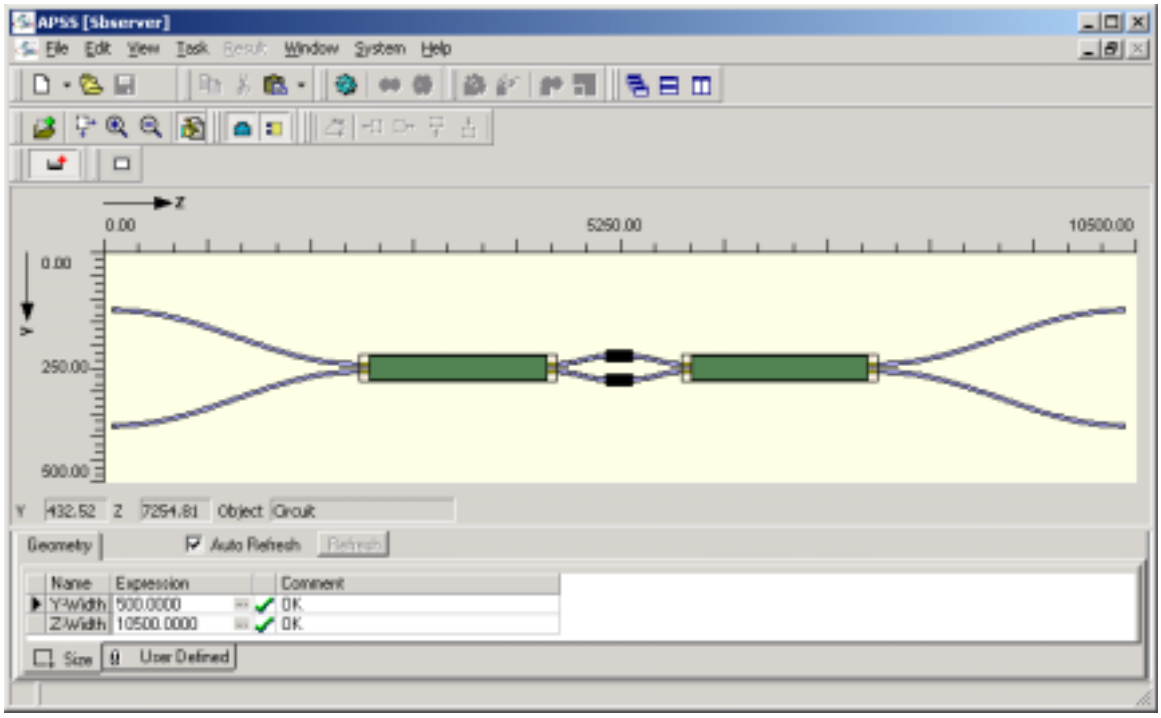


図９．MZI アッド/ドロップフィルタの回路プロジェクト

3.5.2 コネクタ

本設計では２種類のコネクタが使われている。

- 直接接続 – 回折格子間
- S 字曲がりコネクタ– 3dB カップラと入出力ポート間並びに回折格子と 3dB カップラ間

3.5.3 解法設定

波長、スキャンする波長数、偏波などは既にロードしたデバイスプロジェクトで計算されたものだから、回路解析方法の選択は論理的にはかなり限定的となってしまう。しかし、コネクタの解法設定には多くのオプションがある。コネクタは位相シフトの効果だけなので曲がり損失が小さい限りデフォルトの解析的解法で十分である。しかし、曲がり損失が大きな場合には数値解法や３次元のベクトル解析を推奨する。

ここに例題として示したものでは、コネクタの測定ロスは小さくほんの少しの位相シフトのみなので、設計者はデフォルトである高速解法の解析的手法を用いることができる。

3.5.4 シミュレーション結果

図１０は２つの偏波に対しての反射（ドロップに対応）と透過の特性である。図８に示した長い回折格子と比較して、3dB カップラの挿入損が加わったことを除いては同様な特性となっていることがわかる。また、偏波無依存も観測されている。

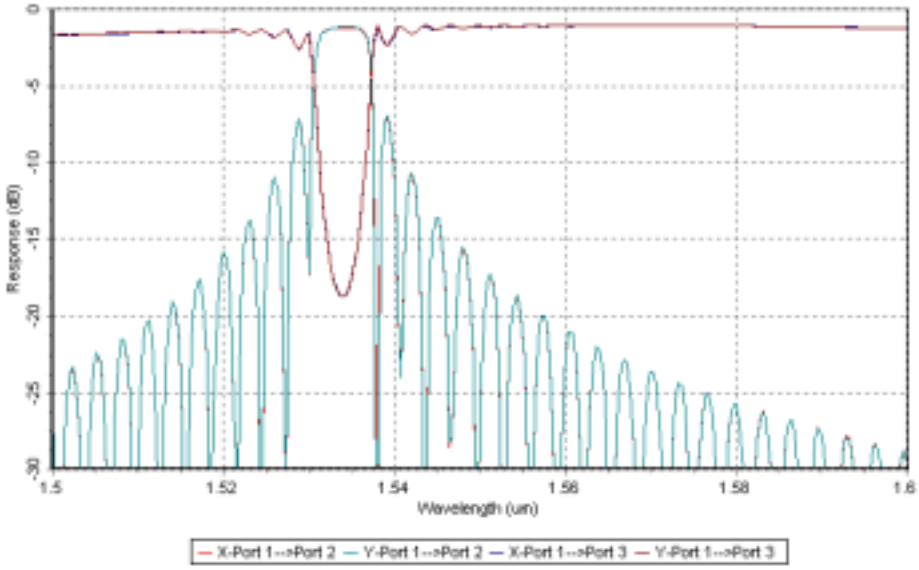


図１０．MZI のアッド/ドロップフィルタの透過と反射特性

入力ターミナルやアッドターミナルへの空間的クロストークも図１１に示すようにモニタした。この設計では、そのクロストークは約-30 dB である。

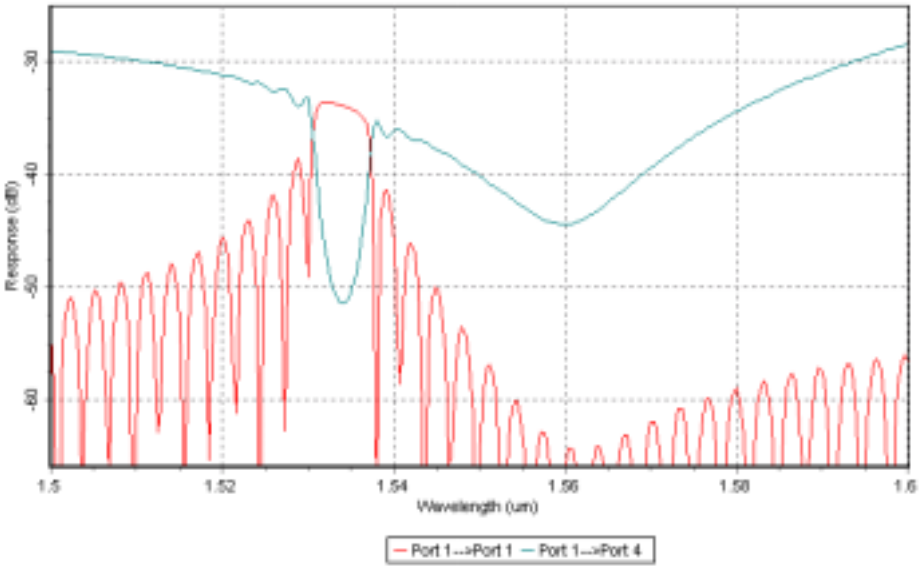


図１１．MZI アッド/ドロップフィルタのクロストーク

3.5.5 プロジェクトのエキスポートとファイル

エキスポートには２つの方法がある。①プロジェクトのエキスポートと②レイアウトマスクのエキスポートである。

①プロジェクトのエキスポートでは、材料、導波路、デバイスの全てのプロジェクト情報をエキスポートすることができる。このファイルは拡張子が“*.apx”となり、APSS でインポートすることができる。

②幾何学的なレイアウトマスクがエキスポートされると、これらは AutoCAD ファイル用には“*.dxf”、または GDSII ファイルでは “*.gds”となる。これらは図１２に示すように他のマスクレイアウトソフトにインポートされる。

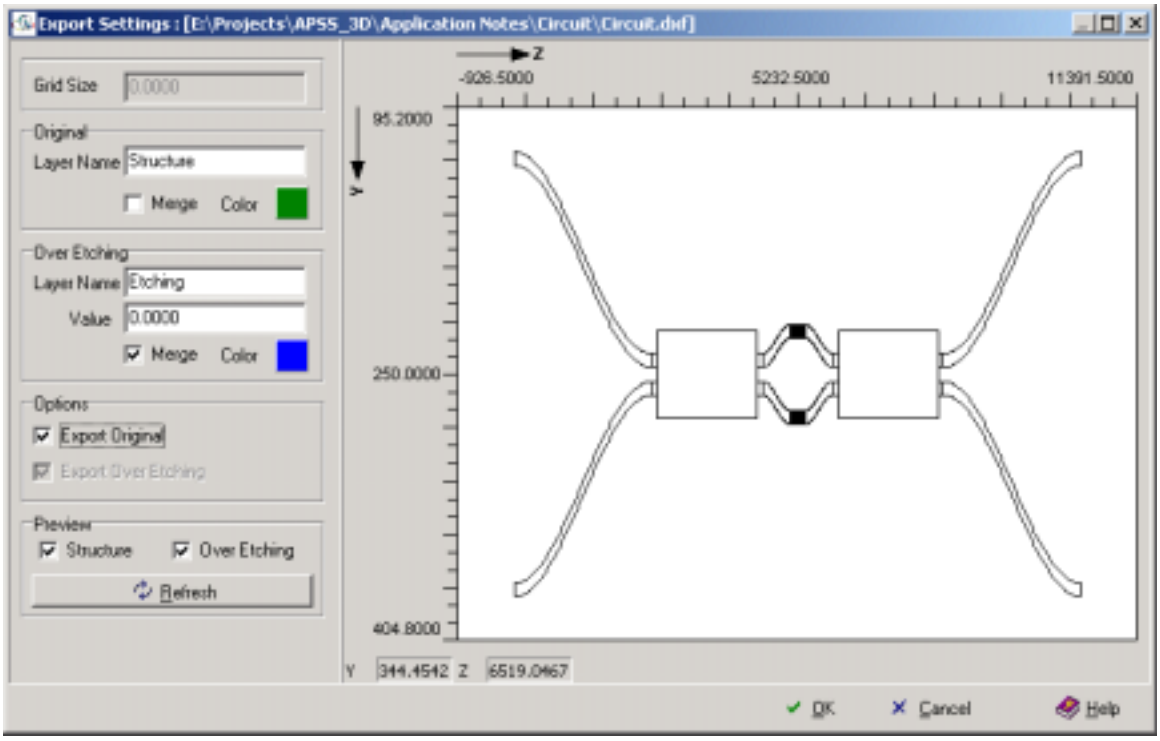


図１２．回路のマスクレイアウトファイルへのエキスポート

> ***注意:*** この例題ではターミナルはシンボルとして記しているだけなのでエキスポートされない。設計者がターミナルもレイアウトに含めたいならば、直線導波路または直線のコネクタを使わなければならない。

4 議論

APSS 回路モジュールは大きな複雑な構造を小さな構造に分解する便利なプラットフォームである。このお陰で計算や解析を行うことが可能となる。ここの問題をどのように最適化を行うかは本資料の領域を超えており、また別途議論することとする。

回路の性能向上には、設計者はデバイスモジュールや導波路モジュールまで立ち戻り導波路構造や回折格子の詰めを行う。最も重要な事柄を以下にまとめる。

- 高密度波長多重(DWDM)応用には狭いバンド幅が要求される。この目的実現には、回折格子は長く、結合は弱くなければならない。従って。グレーティングの高さ(H_g)は小さくなければならず、短い回折格子を縦続接続して長い回折格子とする。
- 回折格子のアポダイゼーションは反射スペクトルのサイドローブを抑制するのに有効である。この目的実現のためには回折格子の高さ(H_g)の異なる幾つかのものを組み合わせて中央の結合が強り、両端が弱い結合となるようにする。

5 まとめ

実例で示したように、APSS は大規模で複雑な光集積回路をいつくかのサブコンポーネントに分解することができる。分解された構造はそれぞれに合った解析をすることができる。それらの結果を総合して全体として設計、シミュレーションすることが可能である。

6 参考文献

[1] T. Mizuochi, T. Kitayama, K. Shimizu, K. Ito, “Interferometric crosstalk-free optical add/drop multiplexer using Mach-Zehnder-based fiber gratings,” *IEEE J. of Lightwave Tech*., vol. 16, pp. 265-276, Feb. 1998

[2] Y. Hibino, T. Kitagawa, K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo, J. Albert, and D. C. Johnson, “Wavelength division multiplexer with photoinduced with phtoinduced Bragg gratings fabricated in a planar-lightwave-circuit-typle asymmetric Mach-Zehnder interferometer on Si,” *IEEE Photon. Technol. Lett,*. vol 8, pp. 84-86, Jan. 1996.

[3] T. Erdogan, “Fiber grating spectra,” *IEEE J. of Lightwave Tech*., vol. 15, pp. 1277-1294, Aug. 1997

[4] B. E. Little and C. Wu, “Window functions for ideal response in distributed feedback reflection filters,” *IEEE Photon. Technol. Lett,*. vol 9, pp. 76-78, Jan. 1997.