

Multi-Mode Interference (MMI) Devices

に関するアプリケーションノート

設計、シミュレーション、レイアウト

APN-APSS-MMI

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: July 2, 2003

日本語版:2003 年 12 月 19 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(Apollo Photonics Solution Suite)に含まれているテンプレートを用いて、MMI の設計に関するものであり、MMI の概要、設計の実例、最適化について記されている。

以下の事柄が記されている:

- MMI の動作原理、基本設計思想、性能パラメータ
- 解析的な方法や数値解析による MMI デバイスの基本的な設計過程
- パワースプリッター、カップラー、合波器などの MMI 系のキーデバイスに関する議論
- プロジェクトのインポート、数値解析の設定方法、シミュレーション結果の表示など MMI 系デバイスの設計ステップの概要
- 既に公開されている学術論文に記載されている実例でのシミュレーション結果との比較

APSS は 4 つのモジュールから成っている: 材料、導波路、デバイスと回路である。それぞれのモジュールは目的に特化された設計が可能であるので APSS は材料やデバイスに極めて自由度高く適用することができる。

キーワード

APSS、デバイスモジュール、MMI(多モード干渉デバイス)、パワースプリッター、カップラー、スイッチ、合分波器、過剰損失、クロストーク、強弱導波モード、解析的手法、数値解析手法

目次

1	はじめに	5
2	理論.....	5
2.1	動作原理.....	5
2.2	基本設計思想.....	7
2.3	性能パラメータ.....	8
3	設計とシミュレーション	10
3.1	全体設計.....	10
3.2	パワースプリッター.....	11
3.3	カップラー.....	11
3.4	不均一なパワースプリッター.....	11
3.5	合波器.....	12
3.6	シミュレーションと最適化.....	13
4	実例.....	16
4.1	材料設計と導波路設計.....	16
4.2	テンプレートを用いての MMI プロジェクト作成	19
4.3	解法設定.....	19
4.4	実行と表示.....	22
5	まとめ.....	27
6	参考文献	27

1 はじめに

多モード干渉 (MMI) デバイスは今まで精力的に研究されてきた。そして、このデバイスは光集積回路(PICs)を構成するキーデバイスである。MMI デバイスの動作原理は多くのマルチモードが存在する MMI 領域でビームが集光したり離散したりしながら干渉することによる。MMI デバイスは低挿入損失、広い帯域、偏波依存性が小さい、クロストークが小さい、製造のトレランスがあるなどの利点から、カップラー、パワースプリター、合波器、モード変換器、フィルター、ルーターなど多くの応用が期待されている [1]。そして、より複雑なリングレーザ、光変調器、マッハツェンダー干渉計(MZI) スイッチ、合分波器、波長変換器などの応用もできる。

2 理論

この節では MMI デバイスの動作原理が記されている。また、MMI 系デバイスの基本的な設計指針や性能パラメータについても述べられている。

2.1 動作原理

MMI デバイスの動作原理はマルチモード導波路でのセルフイメージに基づいている。ここでは簡単のために図 1 に示す 1×1 の矩形 MMI の例で説明する。MMI は一般的に 3 つの部分から成っている。入力ポート (左ポート)、MMI 領域、出力ポート (右ポート) である。実際に使われる MMI では M 入力、 N 出力でテーパー型になっているものが多い。3 種類の MMI がありそれぞれ、異なった干渉をする。

注意：カテゴリーの詳細な説明、数値解析のパラメータ設定については APSS マニュアルのデバイスモジュール部分に記載されている MMI のテンプレートを参照されたい。

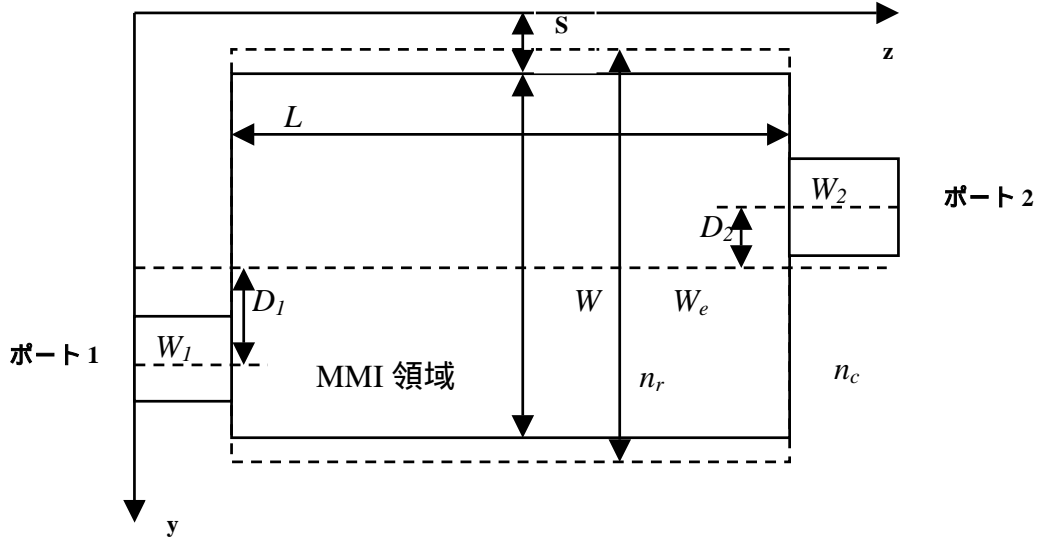


図 1 . MMI デバイスと本レポートでの変数

ここでは、MMI デバイスのセルフイメージ効果を表現するために、解析手法の一つである導波モード伝搬法 (MPA)を用いる。この手法では、伝搬定数 β_i ($i= 0, 1, 2, 3, \dots, N$, ここで N は伝搬モードの数)の MMI のマルチモードは以下の近軸近似で与えられる[1]。

$$\beta_0 - \beta_i \approx \frac{i(i+2)\pi}{3L_\pi} \quad (1)$$

ここで L_π は基本モード($i=0$)と第一次モード($i=1$)の結合長 (ビート長) である。

$$L_\pi \equiv \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda} \quad (2)$$

ここで λ は自由空間での波長、 W_e は MMI 領域の実効幅である。

$$W_e \approx W + \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{n_c}{n_r} \right)^{2\sigma} / \sqrt{n_r^2 - n_c^2} \quad (3)$$

ここで W は MMI 領域の実際の寸法で、 n_r はコア、 n_c はクラッドの実効屈折率である。また、整数 $\sigma=0$ は TE モード、 $\sigma=1$ は TM モードに対応する。導波モード伝搬解析[1]によると、3つの異なったセルフイメージ現象を観測することができる。

- (i) 1xN 対称型セルフイメージ: MMI 領域に中央の 1 つのポート($D=0$)からのみ入力されると奇数モードの係数はゼロになる。式(1)から、セルフイメージの距離と N 重のイメージの距離はそれぞれ、 $\frac{3}{4}L_\pi$ と $\frac{3}{4}L_\pi/N$ になる。
- (ii) 2xN 制約型セルフイメージ: MMI 領域に $D=\pm W_c/6$ の 1 つまたは 2 つの入力ポートから入力されると、2 番目、5 番目、8 番目などの係数はゼロになる。式(1)より、セルフイメージの距離は $2L_\pi$ 、鏡像距離は L_π 、N 重イメージ距離は L_π/N となる。
- (iii) MxN 一般的なセルフイメージ: MMI 領域の任意の位置($-W/2 < D < W/2$)の 1 つまたは M 入力ポートから入力されるとモードの係数はゼロではない。式(1)から、セルフイメージの距離は $6L_\pi$ 、鏡像距離は $3L_\pi$ 、N 重イメージ距離は $3L_\pi/N$ となる。

従って、入力フィールドのプロファイルは導波路の伝搬方向に沿ってある周期的な間隔で 1 つまたはマルチの像として再生される。既に述べたように、一般的なセルフイメージ MMI デバイスと比較すると、同一幅、同一結合長では、対称型では 1/4、制約型では 1/3 の MMI 領域となることがわかる。

2.2 基本設計思想

MMI の動作原理を理解して、シリカとか InP と言った材料依存を含めてのパワースプリッター、結合器、モード変換器などへの設計要求事項の理解をすると、解析的手法や数値解析手法を用いて MMI デバイスを設計することができる。上述の事柄から、対称型セルフイメージは最も短く構成できるデバイスであり、短いほどトレランスに優れている。従って、デバイスは一般的にはできるだけ短く設計すべきである。しかし、最終的なデバイスの構成は、どのような機能のデバイスにするのか、どんな材料を用いるのか、そしてどんな製造方法で実現するのかに関係する。例えば、パワースプリッタでは出力の位相は重要ではないので対称型セルフイメージが使うことができる。3dB のカップラーでは出力の位相差は $\pi/2$ であり、制約型イメージや一般的なセルフイメージが使われる。鏡像を用

いる合波器では（対称型セルフイメージでは鏡像とならないので）制約型イメージや一般的なセルフイメージが使われる。

最小のギャップサイズ（ピッチとポート幅の差）は材料や製造技術に依存する。一般的セルフイメージの MMI は制約型のものよりもギャップサイズは大きい。挿入損失やバンド幅はポート幅を大きくすると改善される。しかし、ポートの幅が広くなると高次モードが立つことになる。高次モードでは式(1)～(3)に示した結像条件を満足しないので対称セルフイメージ型や制約セルフイメージ型では意図したように結像しない。この欠点を克服するためにテーパ型ポートが用いられる。

式(2)から、MMI デバイスの長さは実効幅によって決まっていることがわかる。もし、MMI デバイスをバタフライ型に形成することができればデバイスの実効幅を減少させることができ、その結果として MMI デバイス長を短くすることができる。

MMI デバイスは一般的には設計が易しく、導波モードでは強導波と弱導波がある。デバイスに要求される精度、シミュレーション時間の制約から APSS ではいくつかの解析的手法、数値解析手法が用意されている。また反射を考慮したいくつかの解析も可能である。一般に、強導波型 MMI では、反射を考慮した解析手法で大部分の応用には十分である。弱導波型 MMI では、反射を考慮しない数値解析手法で十分である。

2.3 性能パラメータ

挿入損 $L_i(\text{dB})$ とか反射損 $L_r(\text{dB})$ など共通でよく使われる性能パラメータの他に、この節では MMI デバイスに特に関係する性能パラメータについて議論する。

デバイスの過剰損 $L_e(\text{dB})$ は出力パワーの総和と入力パワーの差によって定義される。

$$L_e(dB) = -10 \log_{10} \left(\sum_j P_j / P_{in} \right) \quad (4)$$

カップラーとして、クロストークとパワーバランスの 2 項目について評価する。クロストーク $L_c(dB)$ は望む出力(P_d)と望まない出力 (P_u) の比である。パワーバランス $L_b(dB)$ は 2 つの出力ポートの出力比である。

$$L_c(dB) = 10 \log_{10} (P_d / P_u) \quad (5)$$

$$L_b(dB) = -10 \log_{10} (P_{d1} / P_{d2}) \quad (6)$$

ここで、カップラーのクロストークとパワーバランスはそれぞれ消光比 (コントラスト) と結合比として評価される。

MMI デバイスを設計する際に重要な事項として、幅に関しては $\delta W/W$ 、長さに関しては $\delta L/L$ 、波長に関しては $\delta \lambda/\lambda$ 、の設計トレランス (許容) があり、それは式 (7) で与えられる [2]。

$$2 \frac{\delta |W|}{W} = \frac{\delta |L|}{L} \approx \frac{\delta |n_r|}{n_r} \approx \frac{\delta |\lambda|}{\lambda} \quad (7)$$

ここで幅のトレランス $\delta W/W$ は次のように計算される。

$$\frac{\delta |W|}{W} \leq Z(L_e) \frac{3\pi d^2}{8W^2} \quad (8)$$

ここで d は入力ポートのモード幅、 $Z(L_e)$ は過剰損失 L_e の関数として次のように表わされる。

$$Z(L_e) = \sqrt{(4 - 5T^2) + \sqrt{((4 - 5T^2)^2 - 16T^4 + 16T^2)/(8T^2)}} \quad (9)$$

ここで、 $L_e(dB) = -10 \log_{10} T$ 式(7)に示したように、デバイスの幅の製造変動のトレランス $\delta W/W$ はカップラー長 L に逆比例する。波長 $1.55 \mu\text{m}$ で InP(屈折率 $n = 3.44$) 基板に作成された制約型 2x2 MMI 3dB カップラーで長さは $L = L_\pi/2$ 。そして、 $W=12\mu\text{m}$ 、 $d=3\mu\text{m}$ でデバイス長 $L=213\mu\text{m}$ とすると、過剰損失 0.5 dB で、 $\delta W=0.08\mu\text{m}$ 、 $\delta L=2.89 \mu\text{m}$ 、 $\delta \lambda=2.1 \text{ nm}$ である。明らかに、波長変動のトレランス $\delta \lambda$ が最も厳しい値となっている。MMI デバイスで入出力のポートにテーパー

を導入するとこの波長変動トレランスを緩和することができることには注目すべき点である。

3 設計とシミュレーション

3.1 全体設計

本節では MMI デバイスの一般的な設計手順について記す。経験から次のような過程となる。

- (i) 材料やデバイス機能から判断してセルフイメージの型を決める。
- (ii) 矩形型 MMI を用いて解析的手法でデバイス性能をチェックしてデバイスの大きさを決める。
- (iii) テーパー型 MMI やテーパーポートを用いて最終設計とする。矩形型 MMI とテーパー型 MMI を比較すると、テーパー型 MMI では MMI 領域を短くしこの領域でのモードミキシングを起こし、一様出力や挿入損失のままでバンド幅を改善することができる。
- (iv) デバイス解析でパラメータのスキャン機能を用いて、メッシュも十分切って MMI デバイス設計の最終の詰めを行う。

一般的に、デバイスモジュールで MMI デバイス設計を行う前に材料モジュールを用いて材料設計、導波路モジュールを用いて導波路設計を終えておかなければならない。

MMI デバイスには曲げはないけれどもサブコンポーネント（スターカップラなど）、コネクタ（S 字曲がり）を用いて APSS の回路モジュールでより複雑なものを構成して行くことができる。回路解析でどのような複雑な MMI を構築するか 2 つについては APSS のユーザマニュアルをご参照ください。

3.2 パワースプリッター

パワースプリッターの設計では要求された均一の出力を得るために $1 \times N$ の対称型セルフイメージ MMI ($D=0$) を用いた。式(1)に基づき、 $1 \times N$ MMI の長さは $L = \frac{3}{4} L_\pi / N$ となる。出力ポート p ($p=1, 2, \dots, N$) のフィールドは次のように記述される [3]。

$$E_p(D_p) = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp[j\phi_0 + j\frac{\pi}{N}(p-1)(N-p)] \quad (10)$$

ここで出力位置 $D_p = -W/2 + W/N(p-1/2)$ である。

3.3 カップラー

MMI デバイスは均一なカップラーとしても利用される。これは $2 \times N$ 制約型セルフイメージ MMI が用いた。式(1)に基づいて、 $2 \times N$ MMI のカップラーの長さは $L = L_\pi / N$ となる。出力ポート p ($p=1, 2, \dots, N$) のフィールドは次のように記述される [3]。

$$E_p(D_p) = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{cases} \exp[j\phi_0 + j\frac{\pi}{12N}(8N^2 - 1 + 3p(2N + 2 - 3p))], p \text{ 奇数} \\ \exp[j\phi_0 + j\frac{\pi}{12N}(8N^2 - 6N - 4 + 3p(2N + 4 - 3p))], p \text{ 偶数} \end{cases} \quad (11)$$

ここで出力位置は次のようになる。

$$D_p = \begin{cases} -W/2 + W/N(p-1/3), p \text{ 奇数} \\ -W/2 + W/N(p-2/3), p \text{ 偶数} \end{cases} \quad (12)$$

3.4 不均一なパワースプリッター

MMI デバイスを不均一なパワースプリッター設計に用いることもある。この時には $N \times N$ の一般的なセルフイメージ MMI が利用される。式(1)から、 $N \times N$ MMI のカップラーの長さは $L = 3L_\pi / N$ となる。 N 入力 N 出力の位置によって様々なパワー分割比が実現される。例えば、 N 入力 N 出力の位置を次のようにする。

$$D_p^{in} = W/2 - pW/N \quad (13)$$

$$D_i^{out} = -W/2 + iW/N \quad (14)$$

ここで $p=(0,1,2,\dots,N-1)$ (N) と $i=(0,1,2,\dots,N-1)$ (N) であり、 $p+i$ は偶数であると、入力ポート p で出力ポート i のフィールドは次のように記述される[3]。

$$E_{pi} = r_{pi} \begin{cases} \exp[j\phi_0 - (p^2 + i^2)\frac{\pi}{4N} + ji\frac{\pi}{2} + jb\frac{\pi}{2}], \text{ for } \cos[(N-i)p\frac{\pi}{2N} - b\frac{\pi}{2}] > 0 \\ \exp[j\phi_0 - (p^2 + i^2)\frac{\pi}{4N} + ji\frac{\pi}{2} + jb\frac{\pi}{2} + \pi], \text{ for } \cos[(N-i)p\frac{\pi}{2N} - b\frac{\pi}{2}] < 0 \end{cases} \quad (15)$$

ここで次式の出力強度となる。

$$r_{pi}^2 = \frac{4}{N} \cos^2[(N-i)p\frac{\pi}{2N} - b\frac{\pi}{2}] \quad (16)$$

3.5 合波器

1×2 MMI デバイスは図 2 に示すように簡単な合分波器 (MUX/DeMUX) として利用される。MMI デバイスは比較的広帯域であるが、2 つの波長帯域(λ_1/λ_2 即ち 1.3 μm /1.55 μm , あるいは 0.98 μm /1.55 μm)での合波を実現することになる。その MMI デバイスは波長 λ_1 で交差(cross)/バー(bar)で波長 λ_2 ではバー(bar)/交差(cross)となる。一般に 1×2 MMI デバイスは制約型や一般的セルフイメージが用いられる。

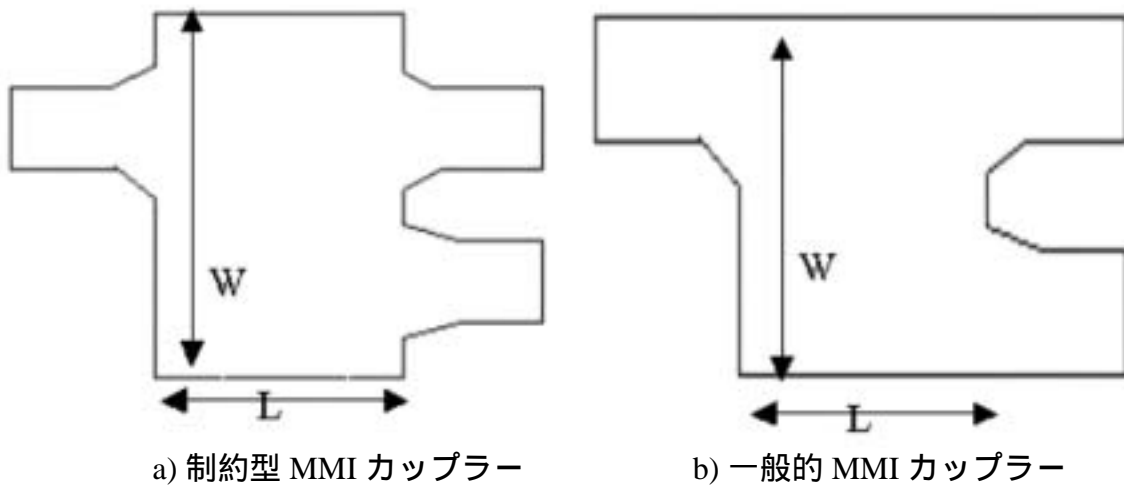


図 2 . 1x2 MMI 合波器の概観

上述した MMI のセルフイメージ理論から、MMI デバイスに入力されたフィールドは MMI カップラー内で周期的な間隔で再生される: $2pkL_\pi$ (バー状態/直接像)や $(2p+1)kL_\pi$ (交差状態/鏡像)である。言い換えれば、MMI デバイスは1波長でバーカップラーであり、もう一つの波長で交差カップラーとして働く。このようにして、 λ_1 と λ_2 の信号を分けることができる。従って、MMI デバイスの全長は次式を満足しなければならない。

$$L = pkL_{\pi,\lambda_1} = (p+q)kL_{\pi,\lambda_2} \quad (17)$$

ここで整数 p は正(自然数)、整数 q は奇数、整数 k は一般的カップラーで3、制約型では1である。 L_{π,λ_1} と L_{π,λ_2} は波長 λ_1 と λ_2 でのビート長である。MMI カップラーのビート長比は次のように記述される。

$$R = L_{\pi,\lambda_1} / L_{\pi,\lambda_2} = (p+q) / p \approx \lambda_2 / \lambda_1 \quad (18)$$

式(18)から MMI カップラーのビート長比は主として波長比によって決まることがわかる。例えば、1300/1550nm の分波器ではビート長比はおおよそ 1.2 となる[4]。長さ L を最小にする p と q の組み合わせは $p=4$ または 5 と $q=1$ である。正確なビート長比 ($R=1.20$) は MMI カップラーの幅を調整することで得られる。

3.6 シミュレーションと最適化

この節では MMI デバイス設計のシミュレーションと最適化について記す。

MMI デバイスの複雑さによって2つの選択がある。APSS のデバイスモジュールで MMI 用のテンプレートを使用する方法とユーザ独自の定義でもって作成する方法である。

一般的に、テンプレートを利用する方法は大部分の MMI をカバーし、極めて有効な方法である。しかし、屈折率変調など特殊な要求がある場合には設計者はユーザ独自の定義でデバイスモジュールを作成しなければならない。ユーザ定義では独自の MMI の形やポートを組み合わせで MMI 全体を構成して行く。

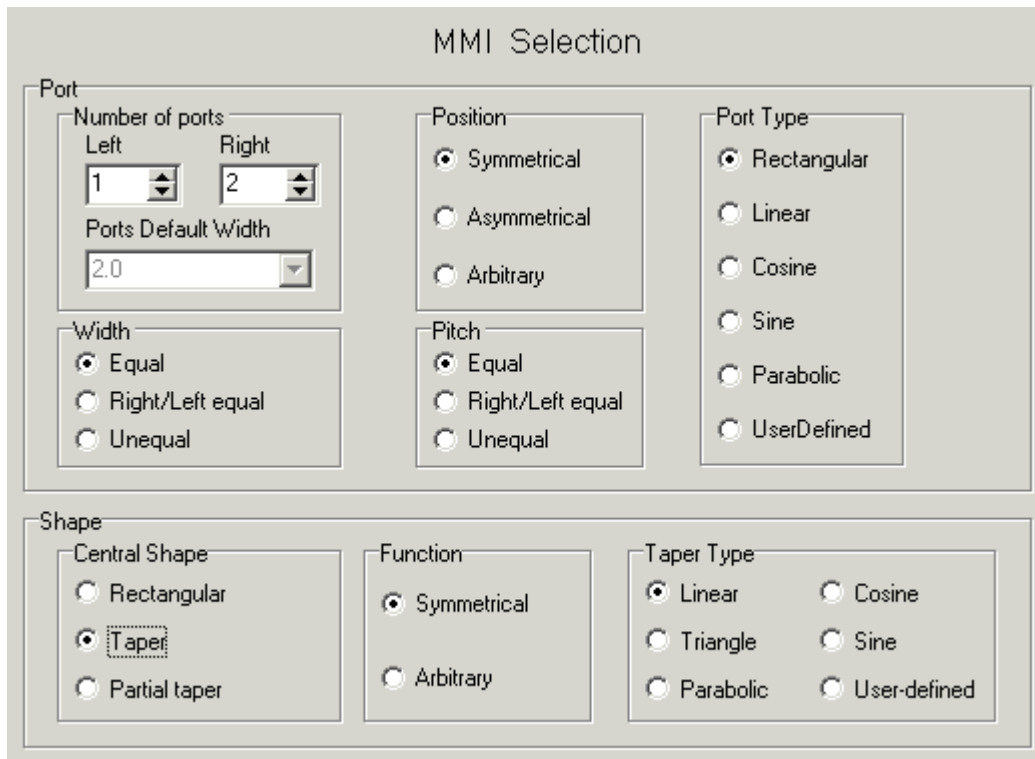
一方、テンプレートを利用すればウィザードによって MMI デバイスが構成される。事前に用意した導波路情報をロードして、“Device type (デバイスタイプ)”で “Multi-Mode Interference”を選択するとウィザードは図 3 に示すデバイスのポート、MMI 領域 (MMI の形) などを入力するように求める。

ウィザードは次に示すように様々な組み合わせを提供している。

- ポート (例えば、ポート幅、位置、ピッチ、形; しかし、ポート幅などは変更できない。これは導波路で定義されたものをデフォルトとして利用する。)
- 形 (例えば、型のタイプ、関数、テーパタイプ)

MMI デバイスには大きく分けて 2 つのタイプがある: 通常型 (通常形状)とテーパ (関数型形状)である。ポートと MMI の形については: “rectangular”、“linear”, “sine”、“cosine”、“parabolic” または “user-defined”である。

注意: MMIデバイスの構築やテーパ関数の詳細についてはAPSSのマニュアルを参照されたい。より小型で低損失MMIの構築やシミュレーションについてはAPSSのデバイスモジュールの中の“star coupler”のテンプレートも利用できる。



The image shows a software dialog box titled "MMI Selection". It is divided into two main sections: "Port" and "Shape".

Port Section:

- Number of ports:** Two spinners for "Left" (set to 1) and "Right" (set to 2).
- Ports Default Width:** A spinner set to 2.0.
- Width:** Radio buttons for "Equal" (selected), "Right/Left equal", and "Unequal".
- Position:** Radio buttons for "Symmetrical" (selected), "Asymmetrical", and "Arbitrary".
- Pitch:** Radio buttons for "Equal" (selected), "Right/Left equal", and "Unequal".
- Port Type:** Radio buttons for "Rectangular" (selected), "Linear", "Cosine", "Sine", "Parabolic", and "UserDefined".

Shape Section:

- Central Shape:** Radio buttons for "Rectangular", "Taper" (selected), and "Partial taper".
- Function:** Radio buttons for "Symmetrical" (selected) and "Arbitrary".
- Taper Type:** Radio buttons for "Linear" (selected), "Cosine", "Triangle", "Sine", "Parabolic", and "User-defined".

図3 . MMI デバイステンプレートのウィザード

デバイスが 詳細に定義された後、ユーザはパラメータスキャンを含めてシミュレーションすることができる。解法の設定(solver setting)では数値解法や解析的手法を含めてユーザには豊富な選択肢が用意されている。例えば、2次元解析とか3次元解析、解析的手法とか数値解析、反射の有無などである。一般的に言って、強導波の MMI では反射を考慮した解析的手法により多くのアプリケーションに適用可能である。弱導波の MMI では反射を考慮しない数値解析手法で十分である。SOI (silica-on-insulator) や ARROW (anti-reflection resonant optical waveguide)と言った特殊な導波路では 3次元解析を奨める。しかし、ユーザ定義モデルでは数値解析手法のみが有効である。

最後に、ユーザは挿入損失、位相差、クロストークなどのシミュレーション結果を表示することができる。また、これらの結果を ASCII text (*.txt)、 Microsoft Excel (*.xls)、また ビットマップ (*.bmp) ファイルに格納することができる。レ

アウト用のマスクファイルとして、DXF と GDSII にエクスポートする機能を有している。

4 実例

この節では所望の MMI デバイス性能を得るにはどのようにシミュレーションをするかについて記す。

4.1 材料設計と導波路設計

既に述べたように MMI のデバイスモジュールを設計する前に材料モジュールを用いて材料設計、導波路モジュールを用いて導波路設計をしなければならない。

材料モジュールでは2つの予め用意された材料系(InP 系とシリカ系)がある。導波路モジュールでは5つの予め用意されたモジュール(リッジ、チャンネル、リッジチャンネル、埋め込みチャンネル、マルチステップ リッジ)がある。これらは大部分のユーザ要求を満足させることができるが、特別なことをしたいとか、もっと複雑な要求に対処できるように APSS はユーザ定義の切り口も用意している。以下、既に報告されている参考文献[2]の構造で計算結果を比較する。

最初のステップは材料プロジェクトを作成することである。“M_InGaAsP, lambda=1.25”で波長範囲 1.4-1.7 μm で2つの材料を考える。一つは“InP”(屈折率は 3.190 から 3.154)で、もう一つは“InGaAsP Bandgap=1.25um”(屈折率 3.375 から 3.353)である。材料プロジェクトをロードした後、既に用意されたテンプレートから“Ridge (リッジ)”で N (層数) =1 を入れる。その結果図 4 に記す“W_Ridge_MMI”プロジェクトが出き上がる。

APSS では幾何学的構造をうまく利用することで計算量を低減させているのでここでは導波路プロジェクトはデバイスの対称性を利用して半分だけ作成した。し

かし、曲がり導波路のような場合には実際の解析では対称性は保たれないので全領域のプロジェクトを作成しなければならない。

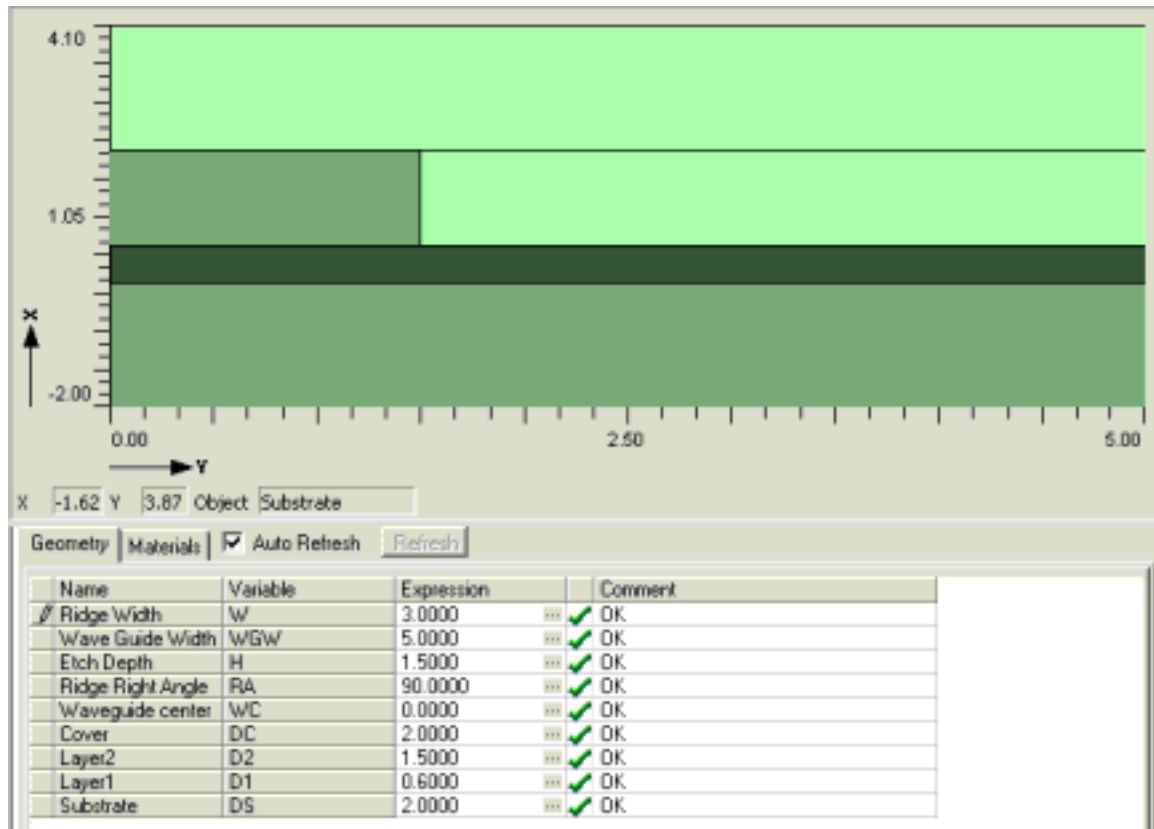



図4．MMI デバイスに対するリッジ導波路プロジェクト

精度高い結果を得るにはメッシュの境界は誘電体の境界とも一致しなければならず、境界でのメッシュ間隔にも注意を要する。この問題を容易に克服するために、マルチセクション メッシュボタン  を利用することを奨める。計算の結果得られた X- と Y-方向偏波の実効屈折率特性を図5に、X-方向偏波に対する E_x フィールドプロファイルを図6に示す。

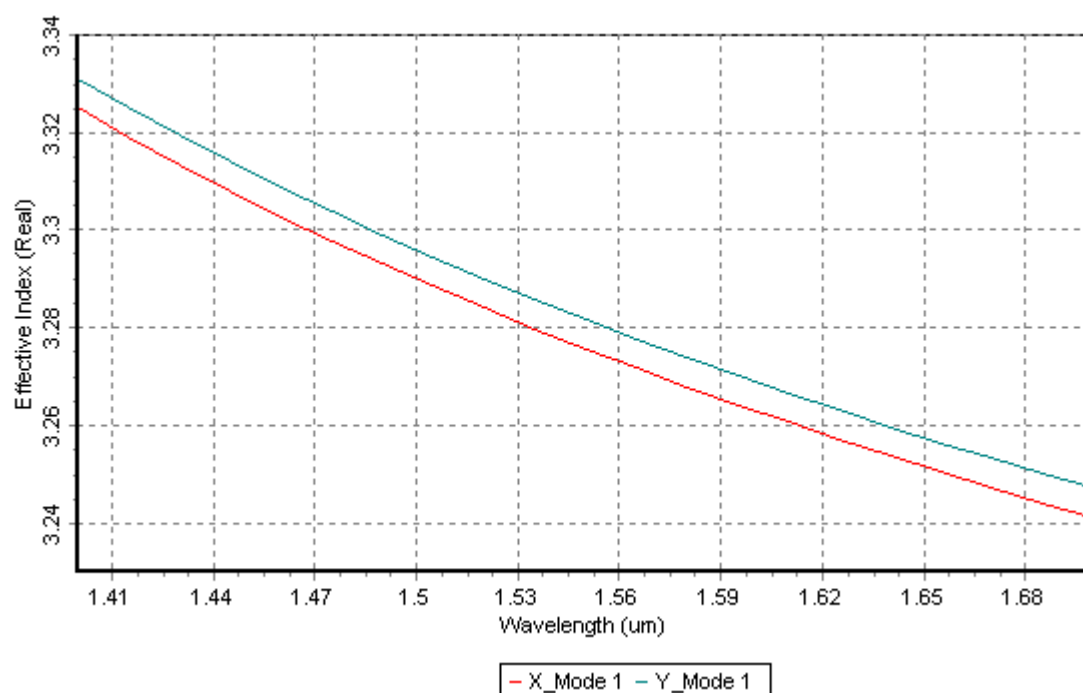


図 5 . リッジ導波路の実行屈折率特性

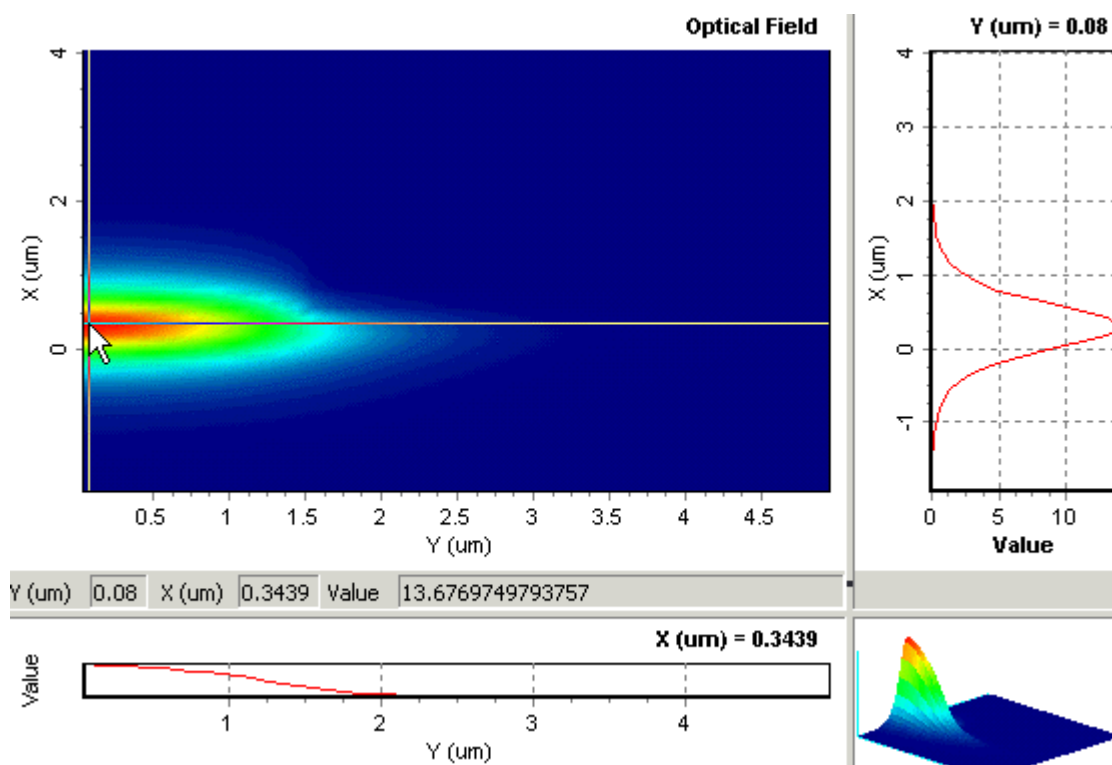


図 6 . リッジ導波路の E_x フィールドプロファイル

4.2 テンプレートを用いてのMMI プロジェクト作成

2x2 3 dB カップラーを作成するための設計パラメータは文献[2]を用いた: MMI 幅 $W=18\text{ }\mu\text{m}$ 、ポート幅 $w=3\text{ }\mu\text{m}$ 、MMI の長さ $L=530\text{ }\mu\text{m}$ である。導波路プロジェクトをロードして、図 3 に示したようにテンプレートの MMI を選択する。ここで、ポート入力部分で $M=N=2$ (入出力のポート数)、“asymmetrical (非対称)” と入力して図 7 に示すようにデバイスプロジェクト“D_MMI2x2”を作成する。

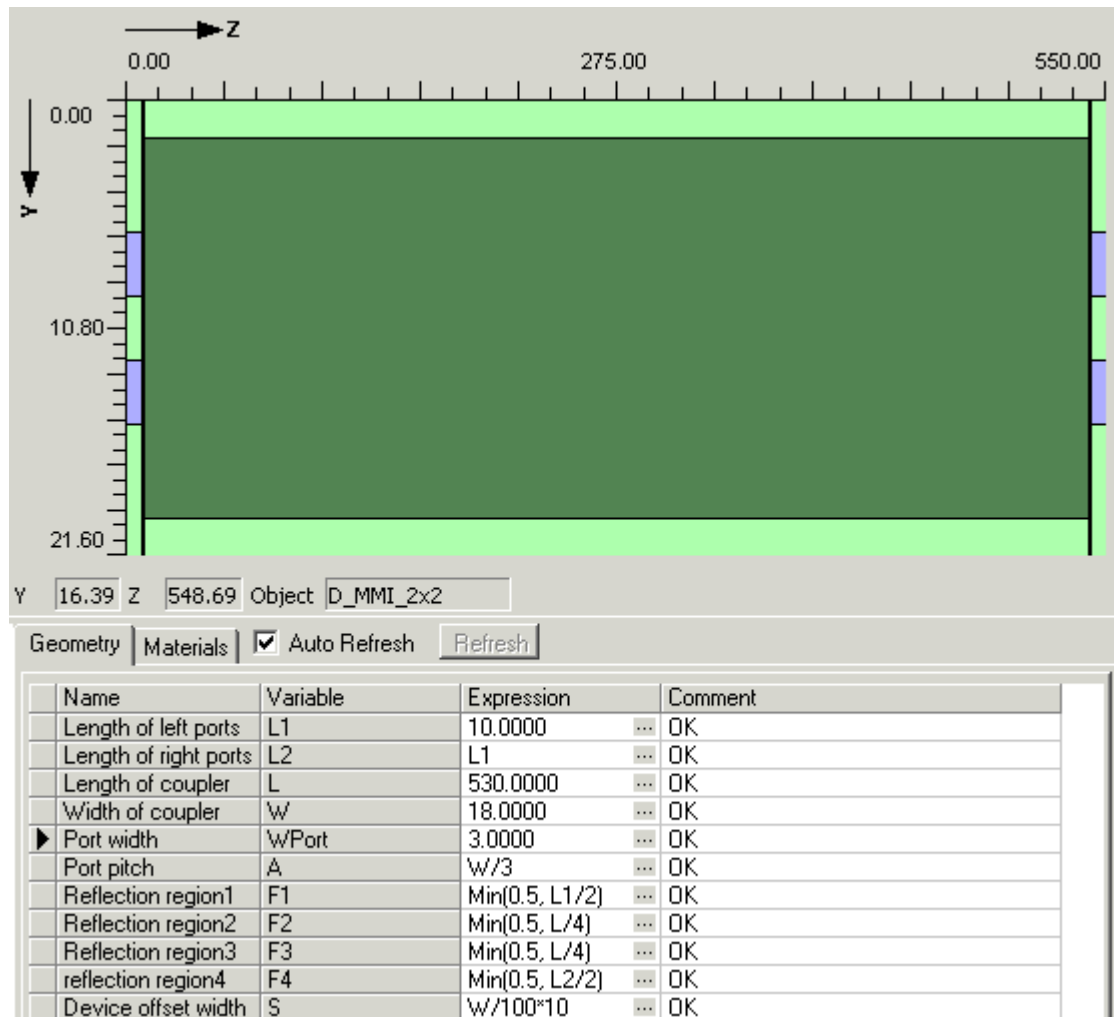



図 7 . 2x2 MMI 3dB カップラーのデバイスプロジェクト

4.3 解法設定

2x2MMI カップラーを作成した後、ユーザは  のボタンをクリックしてシミュレーションするための解法メニューを設定しなければならない。図 8 は “Device

Solver Setting”のウインドウであり、“General Information（一般情報）”、“Solver Selection（解法選択）”、“Variable Selection（変数選択）”の3つのタブから成っている。

“General Information（一般選択）”タブでは、ユーザは“Polarization（偏波）”で所望の偏波を選択する。“Port Information Based on Effective Index Values（実効屈折率に基づく情報）”の部分では“Single Mode Width（シングルモード幅）”がチェックできる。また、“View Mode Profile（モードプロファイルを見る）”で全てのポートのモードプロファイルを見ることができる。

“Solver Selection（解法選択）”タブでは“Output Selection（出力選択）”項目では図8に示すように、“S parameter（Sパラメータ）”が“Field（フィールド）”の計算を選択する。ユーザが“S parameter（Sパラメータ）”を選択した際には、要求される計算精度や計算時間を考慮して引き続いて適当な解法、解析的手法か数値解析かを選択しなければならない。

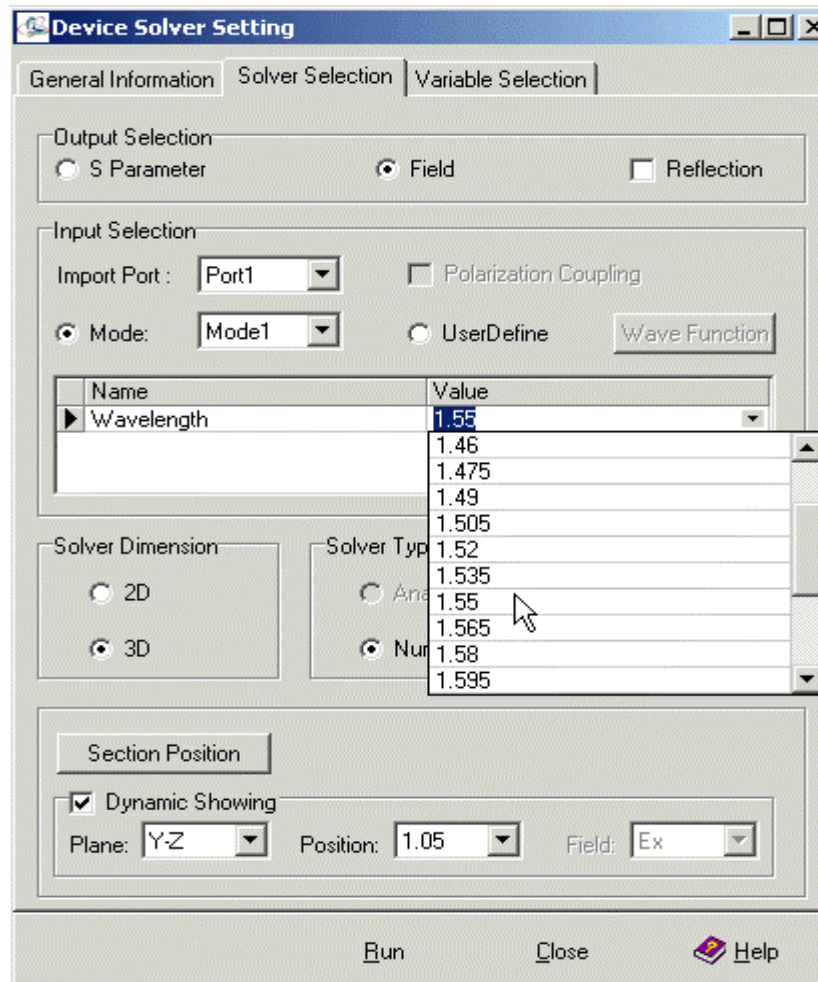


図 8 . 2x2 MMI 3dB カップラーのデバイス解法設定

表 1 . 2x2 MMI 3dB カップラーシミュレーション解法のいくつかの組み合わせ

種類	次元	型	反射
Analytical	2D	Analytical	No
2D BPM	2D	Numerical	No
2D BPM+FDTD	2D	Numerical	Yes
3D BPM	3D	Numerical	No
3D BPM+FDTD	3D	Numerical	Yes

図 8 に示すように “Field (フィールド)” が選択され、“Input Selection (入力選択)” 項目では、“Import Port (入力ポート)” や “Wavelength (波長)” その他 (“Mode number (モード数)” または “User-defined (ユーザ定義)”) を選択する必要がある。2 次元断面の電磁場フィールドは計算途中で刻々と変化する様子を

表示したり、ファイルとして保存することができる。図 9 に示した“Section Position (選択位置)” で設定できる。また、ここで設定した選択位置はメッシュ設定の部分で屈折率分布をモニタする際にも利用できる。

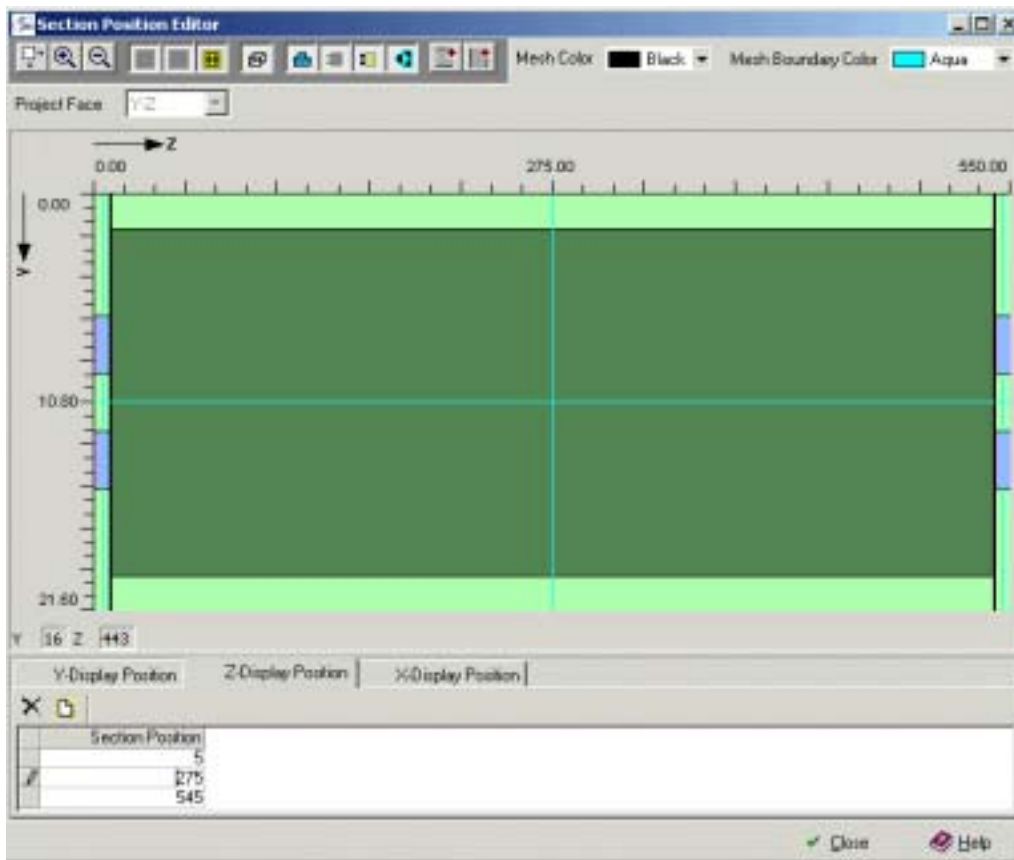


図 9 . 2x2 MMI 3dB カップラー3次元解析時の“Section Position (選択位置)” 設定。

“Device Solver Setting (デバイスの解法設定)” タブでは、スキャンすべき変数を選択しなければならない。スキャンパラメータの選択に際しては“Structure Check (構造チェック)”をしなければならない。現在の APSS のバージョンでは同時にスキャン可能な変数は 2 つまでである。

4.4 実行と表示

解法設定を行った後、“Run (実行)”ボタンをクリックすると S パラメータやフィールドの計算をすることができる。例えば、以下の選択をしたとする。
“Field”[フィールド計算]、“Port 1”[ポート 1 入力]、“Mode 1”[モード 1]、

“1.5 μm ”[波長 1.5 μm]、 “3D”[3次元解析]、 “Numerical”[数値解析]、 “X”[X 方向偏波解析]、 “Dynamic Showing”[実行途中のモニタ]、 “Y-Z”と “1.05”[モニタ位置は YZ 平面で X=1.05 μm]。この場合には図 10 に示す途中経過が表示される。このパネルでは、キャンセル、待機、再開などがシミュレーション途中で選択できる。

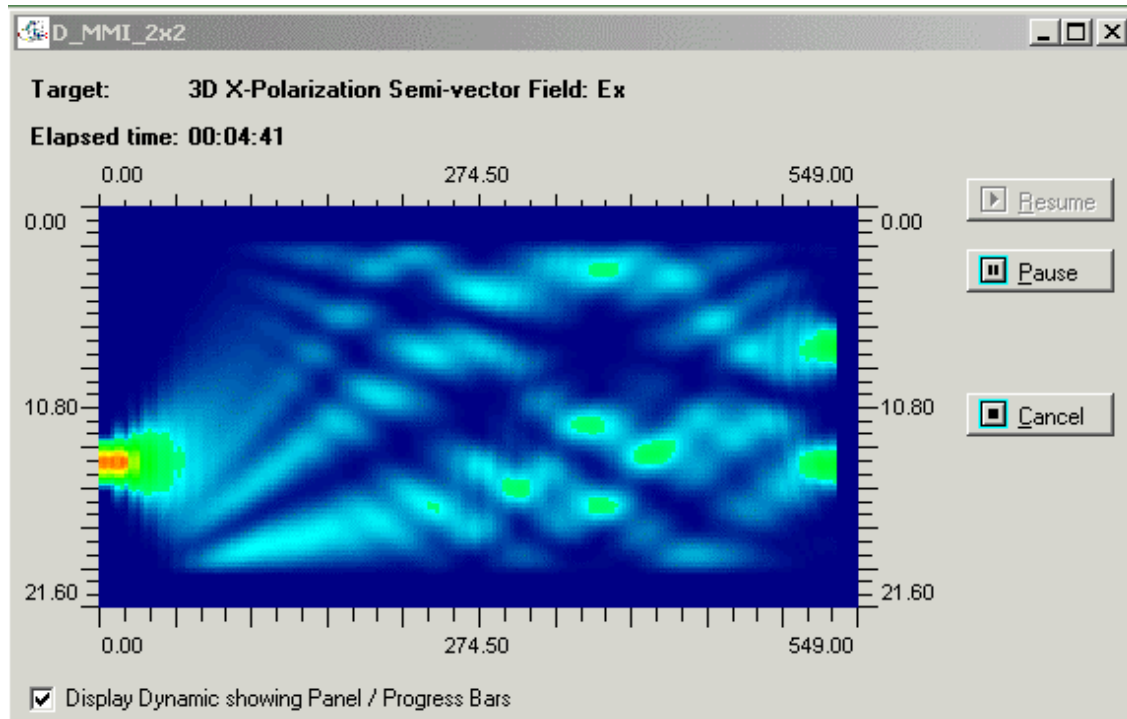


図 10 . 3D X-方向偏波 BPM 解析の計算途中のモニタウインドウ

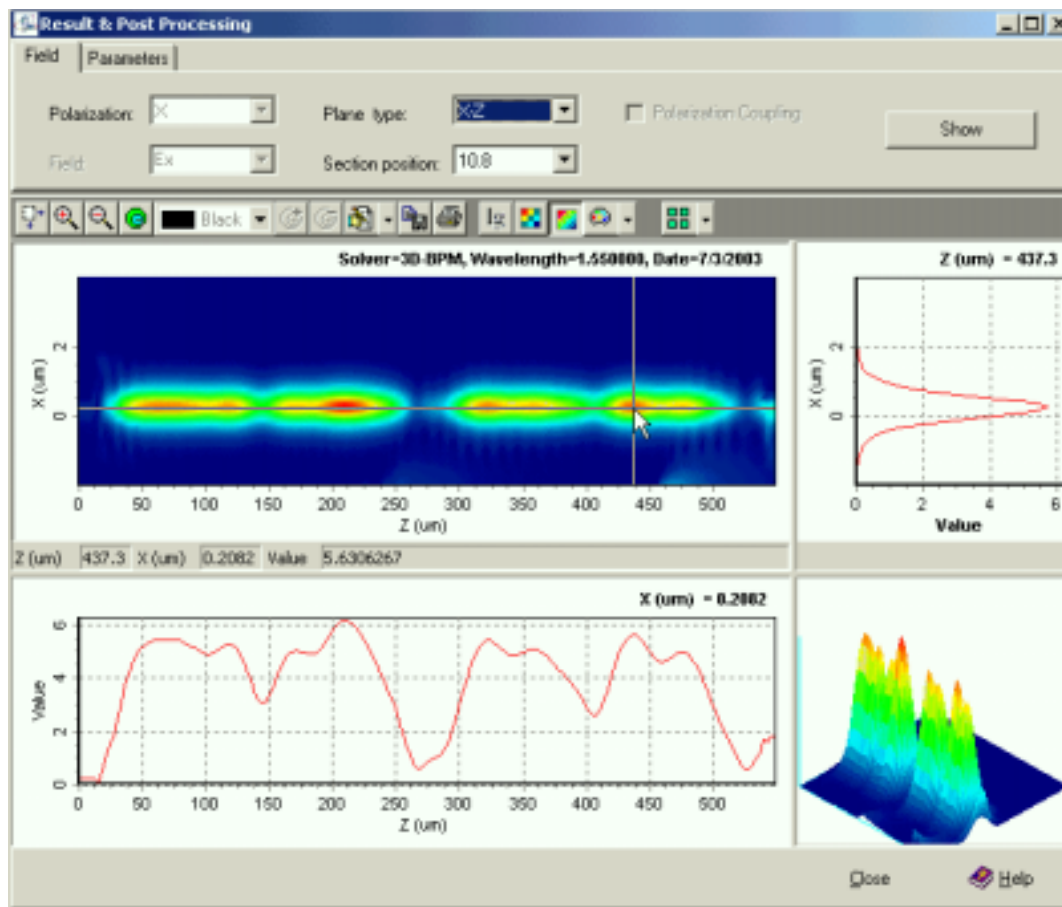
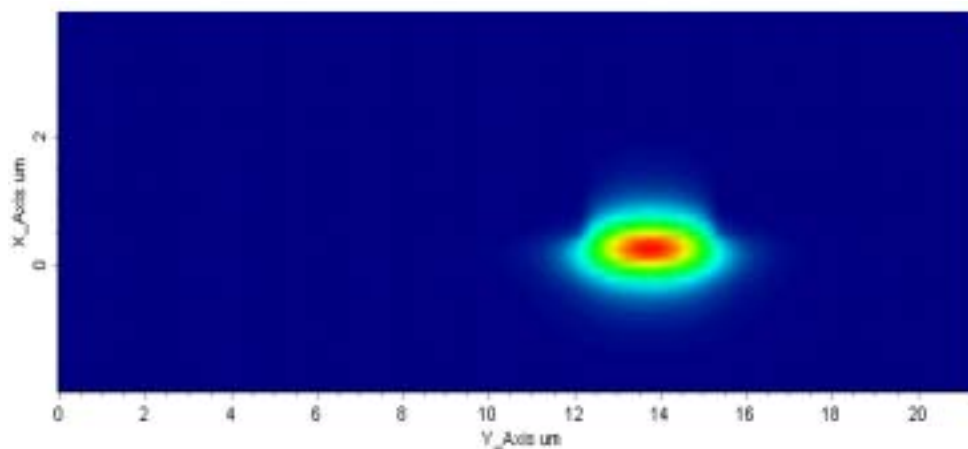


図 1 1 . 3D X-方向偏波 Ex フィールドのプロファイル (X-Z 平面分布@Y=10.8 μm)



(a) Z=5 μm

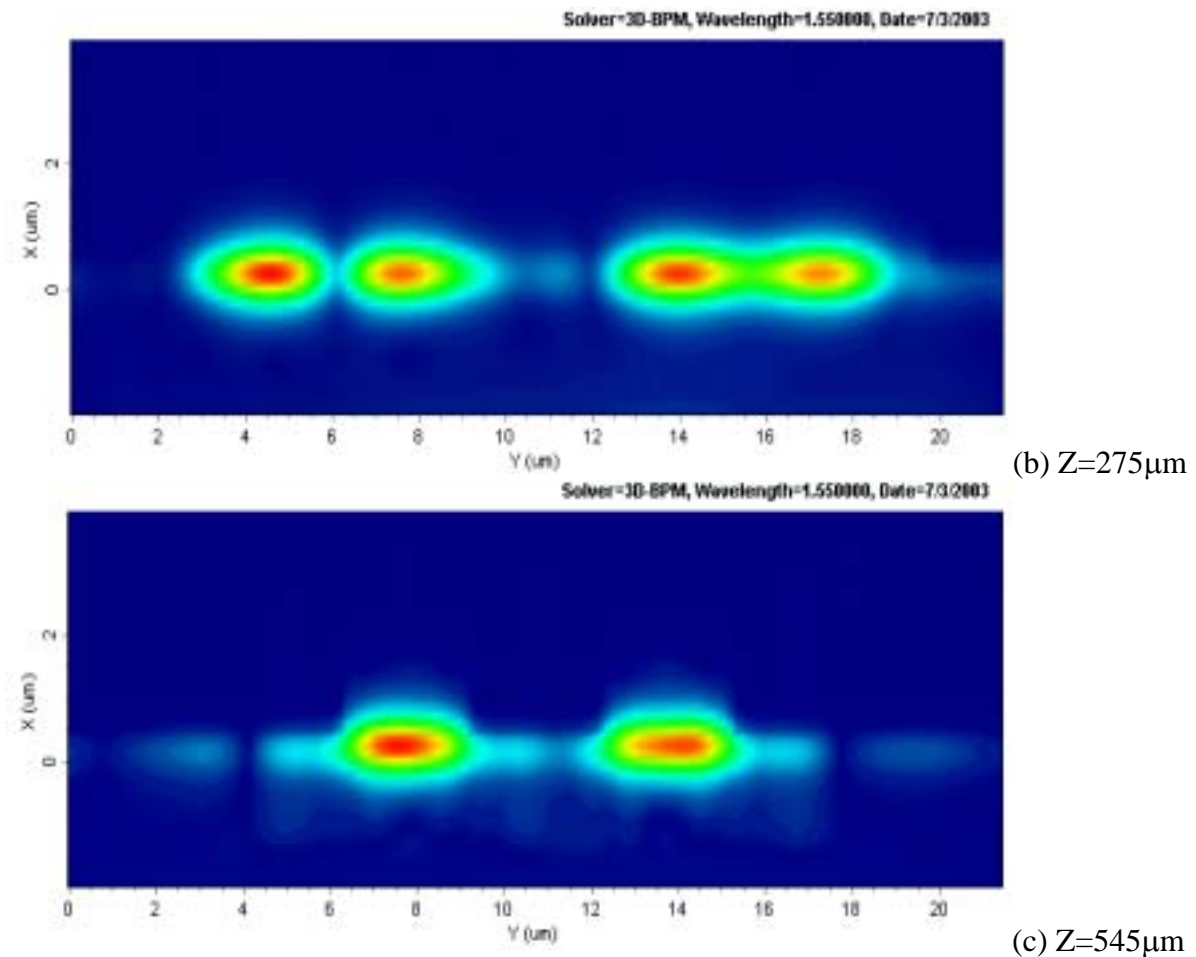




図 1 2 . 3D X-方向偏波 E_x の X-Y 平面でのフィールドのプロファイル (異なった Z 座標にて)

シミュレーションが終わるとユーザは  や  のボタンをクリックすることで S パラメータや“Section Position”で定義したモニタ点での電磁界フィールドを見ることができる。図 1 1 は 3D X-方向偏波解析 E_x フィールドの X-Z 断面分布、図 1 2 は X-Y 断面分布である。図 1 3 は挿入損失の波長依存性、図 1 4 は挿入損失の MMI 幅依存性である。これらのシミュレーション結果は実験結果とよく一致している [2]。

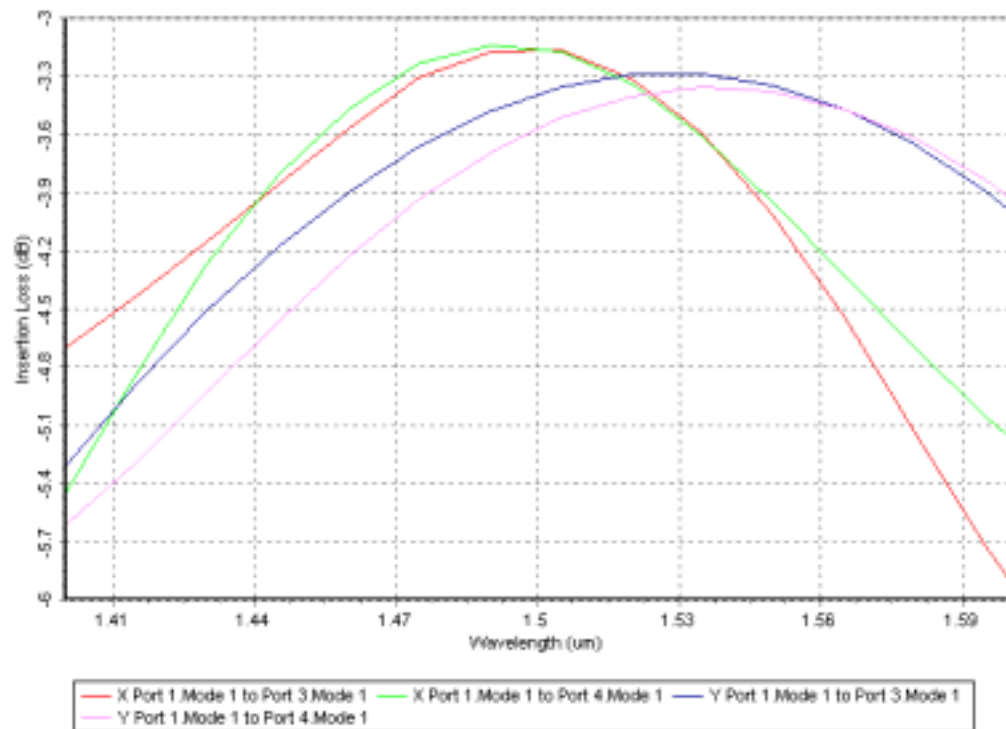


図 1 3 . 挿入損失の波長依存性

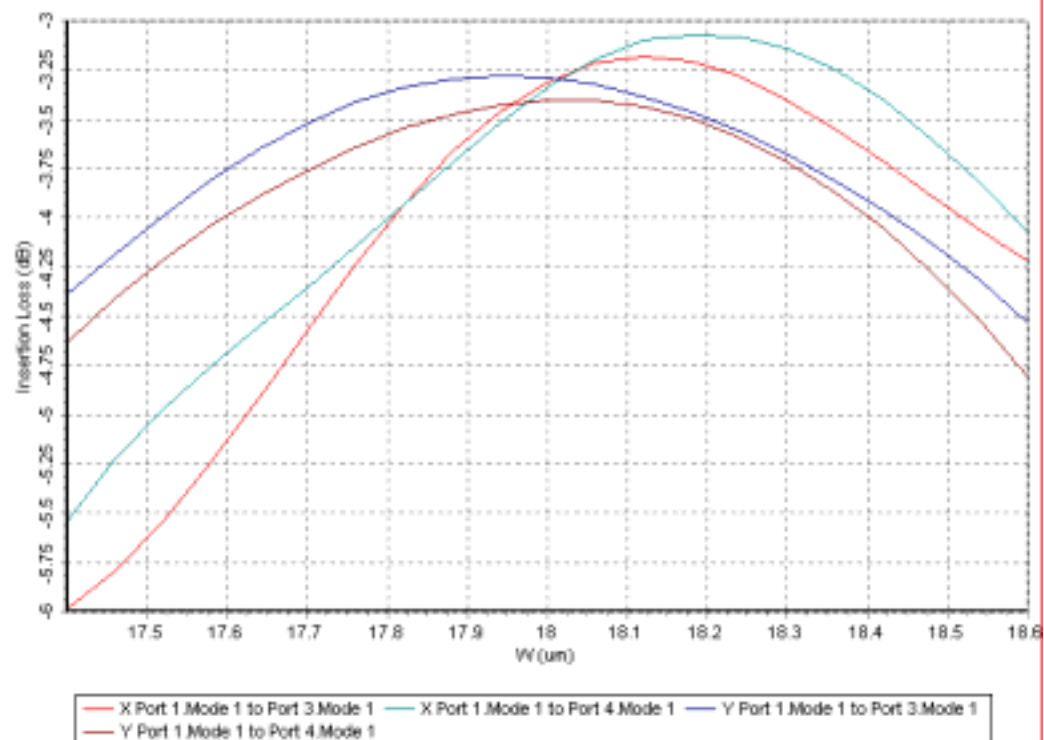


図 1 4 . 挿入損失の MMI 幅依存性

この節では材料から出発してデバイスまでの設計プロセスについて記した。APSS が有している柔軟性やスキャン機能を用いることで MMI デバイスの長さ、偏波、波長依存、ポート幅、MMI 幅、ピッチなどの感度を計算することができる。

5 まとめ

実例で示したように APSS は MMI デバイスを効率的に便利に設計することができる。これは APSS のデバイスモジュールに用意されている知識ベースのテンプレートによって実現が可能である。また、本アプリケーションノートでは MMI デバイスに関する理論と動作原理についても記した。最後に、MMI デバイス設計のプロセスやシミュレーション結果が実験とよく一致することについても述べられている。

6 参考文献

- [1] L. B. Soldano, and C. M. Pennings, “Optical multimode interference devices based on self-imaging: principles and applications,” *J. Lightwave Technol.*, vol.13, no.4, pp.615-627, April 1995.
- [2] P. A. Besses, M. Bachmann, H. Melchior, L. B. Soldano, and M. K. Smit, “Optical bandwidth and fabrication tolerances of multimode interference couplers,” *J. Lightwave Technol.*, vol.12, no.6, pp.1004-1009, June 1994.
- [3] M. Bachmann, P. A. Besses, and H. Melchior, “Overlapping-image multimode interference couplers with a reduced number of self-images for uniform and nonuniform power splitting,” *Appl. Opt.*, vol.34, no.30, pp.6898-6910, Oct. 1995.
- [4] K. C. Lin and W. Y. Lee, “Guided-wave 1.3/1.55-um wavelength division multiplexer based on multimode interference,” *Electronics Lett.*, vol.32, no.14, pp. 1259-1261, July 1996.