

Array Waveguide Grating (AWG)

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-AWG

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 15, 2003

日本語版:2004 年 1 月 20 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)のテンプレートを用いて、AWG(Array Waveguide Grating:アレイ導波路格子)を用いた合波器の設計、シミュレーション、レイアウトについて記されている。

以下の事柄が記されている:

- 動作原理、基本的な設計思想と AWG に性能パラメータに関する記述
- 確立された解析的および数値解析手法による AWG 系デバイスの基本的な設計プロセス
- プロジェクトのインポート、解法の設定、マスキレイアウト、ファイルのエクスポートなど AGW を設計する際のアウトライン
- 既に論文発表されている結果とシミュレーション結果の比較
- 偏波依存、挿入損、クロストーク、波長応答特性のトップの平坦性、熱による制御やチューニングなど AGW 系デバイス設計に関する重要事項

注意: このアプリケーションノートは APSS デバイスモジュールを用いて AWG 系デバイスの設計に関するものである。APSS の他のモジュールに関するものは他のアプリケーションノートを参照されたい。また、APSS のデバイスモジュールの詳細な情報については APSS ユーザマニュアルを参照されたい。

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、AWG(アレイ格子導波路)、MUX(合波器)、DeMUX (分波器)、DWDM(高密度波長分割多重)、挿入損、クロストーク、自由スペクトル領域(FSR: free spectral range)

目次

1	はじめに	6
2	理論.....	7
2.1	動作原理.....	7
2.2	設計の基本思想と設計パラメータ.....	9
2.2.1	波長分散角度と距離.....	9
2.2.2	自由スペクトル領域.....	10
2.2.3	チャンネル間隔と焦点距離.....	10
2.2.4	チャンネルの最大波長数.....	11
2.3	性能パラメータ.....	11
3	設計とシミュレーション	12
3.1	全体設計.....	12
3.2	一般的な設計手法.....	13
3.2.1	基本設計パラメータ.....	13
3.2.2	チャンネルの波長間隔とポート数.....	14
3.2.3	自由スペクトル領域と回折次数.....	14
3.2.4	アレイ導波路の光路差.....	14
3.2.5	ポートのピッチと位置のシフト.....	14
3.2.6	焦点距離.....	15
3.2.7	アレイ導波路数.....	15
3.2.8	その他の設計パラメータ.....	15
3.3	シミュレーションと最適化.....	16
4	実例.....	18
4.1	雛形デバイスの作成.....	18
4.2	テンプレートの解法設定.....	20
4.3	実行と表示.....	22
5	議論.....	23
5.1	偏波.....	23
5.2	挿入損.....	24
5.3	クロストーク.....	24
5.4	フラットトップ応答.....	25
5.5	熱制御/微調整	26

6	まとめ.....	26
7	参考文献	26

1 はじめに

近年、アレイ格子導波路(AWG) —Phasor など他の呼称もある—は DWDM(高密度波長分割多重)通信用の合分波器(MUX/DeMUX)を構成するデバイスとして有名になってきた[1][2]。これは、AWG 系デバイスは比較的低損失で多くのチャンネル数に対して正確に分波することができるためである。

M 入力×N 出力の AWG 合分波器 (MUX/DeMUX) は次のような特徴を有している：ファイバ間が低ロス、チャンネル間隔を狭く正確、多チャンネル向き、偏波無依存、高い安定性と信頼性、大量生産向きなどである。表 1 は今日の WDM 光通信に用いられている波長多重合分波器の主たる性能をまとめたものである[3]。AWG の製造は普通のフォトリソグラフィーに基づいているので、AWG の集積化は、小型化、信頼性、大きな製造トレランス（垂直方向に深いエッチングを必要としない）、低コスト製造とパッケージなど種々の利点をもたらせる。AWG 自身は、正確なチャンネル空間制御（ITU グリッドに容易に適用）、簡単で正確な波長の安定性、均一な挿入損失などの特質を本来有している。

表 1 . WDM 分波技術の比較

仕様	干渉フィルター	BG フィルター	AWG	エッチング回折格子
チャンネル間隔	>100GHz	>100GHz	>25GHz	>10GHz
絶対波長	角度調節	歪調節	熱調節	熱調節
ロス	不均一	低い、不均一	大変低い	大変低い
クロストーク (adj)	-25~ -33 dB	-30~ -35dB	-25~ -35 dB	-25~ -35 dB
クロストーク (bkg)	大変小	大変小	-25~ -35 dB	<-32 dB
PDL(偏波依存ロス)	0.25dB	優秀	0.5dB	0.5dB
パッケージ	ディスクリット	ディスクリット	集積化	集積化
寸法	大	大	小	小
信頼性	良(epoxy)	貧(tuning)	優	良
価格/チャンネル	\$500	\$3000	\$50	\$30
コメント	少チャンネル	少チャンネル	16 チャンネル以上	16 チャンネル以上

2 理論

本節では AWG の動作原理に関して記されている[5][6]。基本的な AWG 系デバイスの設計思想、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

AWG デバイスは WDM や DWDM 方式の光通信では、合分波器、フィルター、アッド・ドロップデバイスなどに用いられる。図 1 は $M \times N$ の AWG 概観である。そのデバイスは隣同士の導波路長差が等しい相互作用することができる導波路アレイが 2 つのスターカップラー(FPZ: free propagation zone) の間にある構成である。AWG の合分波器の動作原理について以下に簡単に記した。

入力導波路の光は最初のスターカップラーのスラブ領域で回折し、アレイ導波路の入力となる。隣接するアレイ導波路の光路差 ΔL は分光器の中心波長 λ_0 整数(m) 倍に設計する。その結果、入力口でのフィールド分布は出力口で再生される。それゆえに、もし、入力導波路が入力面の中心に位置するように置かれると、中心波長は結像面の中心に焦点される。もし、入力波長がこの中心波長からずれて調整されると、アレイ導波路で位相変化が生じる。隣接導波路間で一定の光路差となるので、この位相変化は内側から外側に向かって線形に増加する。このことによって、出力口での波面は傾いてしまう。その結果として、結像面での焦点位置は中心からシフトする。結像面での出力導波路の位置によって空間的に分離された波長を得ることができるようになる。

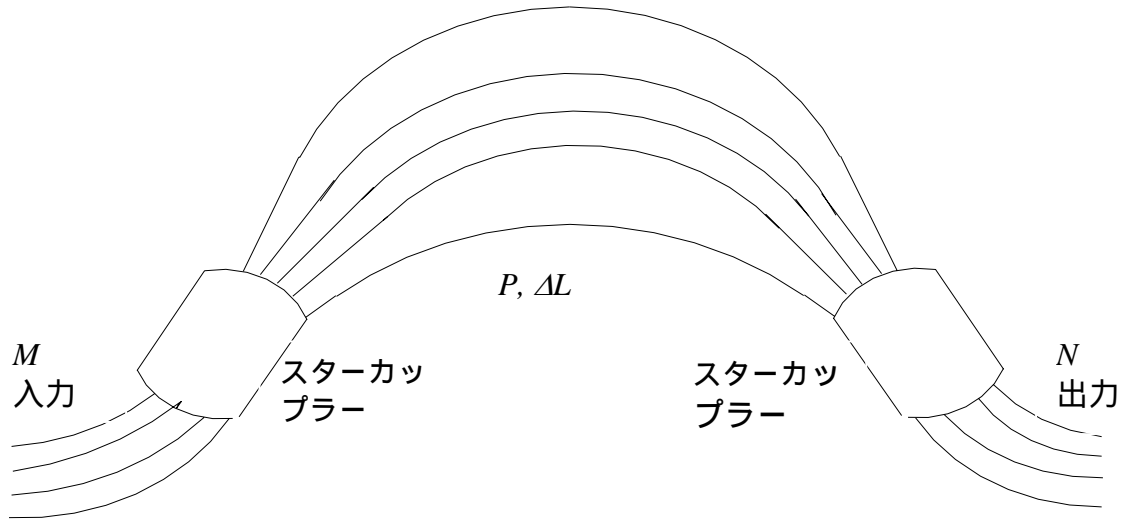


図 1 . M×N AWG 分光器の概観

ここでは、解析的手法であるガウスビーム法(GBA: Gaussian beam approach)が使われている。この手法は AWG デバイスの 1×1 のイメージを描くために使われている。入力導波路から i 番目アレイ導波路への結合係数 K_i は次式で表わされる。：

$$K_i = |f(y_i, z_i)| = \sqrt{\frac{\omega_0}{W_0(z_i)}} \exp\left(-\frac{L_f^2 \sin^2 \theta_i}{\omega^2(\theta_i)}\right) \quad (1)$$

ここで、 θ_i ($y=L_f \sin \theta$ と $z=L_f \cos \theta$) はアレイ導波路と光軸との成す角度であり、 ω_0 は初期のスポットサイズである。逆行原理から、スターカップラーから出力導波路への結合は同じ結合係数で表わすことができる。

P のアレイ導波路を有する $N \times N$ AWG を仮定し、異なったアレイ導波路の寄与の和を取ることで、光軸付近の入力導波路 p 出力導波路 q に対するトランスファ関数は次のようになる：

$$H_0(\lambda) = \sum_{i=1}^P K_i^2 \exp(jk n_c i \Delta L - j \frac{2\pi}{N} (p-q)i) \quad (2)$$

ここで、結合出力 $P_i = K^2_i$ は、全出力で正規化された i 番目のアームのパワーである。対応するチャンネルの周波数応答は出力導波路のモードとこのフィールドの重なり積分で評価できる。

2.2 設計の基本思想と設計パラメータ

AWG デバイスの動作原理を理解した後では、シリカとか InP のように材料に依存して、チャンネル数、波長間隔、偏波依存ロスなどの設計要求に依存して AWG 系デバイスを設計するには解析的手法や数値解析手法が用いられる。

2.2.1 波長分散角度と距離

波長に依存してイメージの結像面での焦点位置のシフト（波面の傾斜角度 $d\theta$ ）は次のように計算される。：

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = k\Delta L \frac{d\lambda}{n_g} \frac{n_g}{(k n_s \lambda_0 d)} = \frac{n_g m}{n_c n_s d} \quad (3)$$

ここで k は伝搬定数、 d はピッチ長、 n_s はスラブ導波路の 2 次元実効屈折率、 n_c はアレイ導波路の実効屈折率であり、 ΔL はアレイ導波路隣接光路差、 λ_0 は AWG の中心波長で m は分波器の回折次数で、次式で定義される。：

$$m = \frac{n_c \Delta L}{\lambda_0} \quad (4)$$

そして、 n_g はアレイチャンネル導波路の群屈折率である。：

$$n_g = (n_c - \lambda_0 \frac{dn_c}{d\lambda_0}) = (n_g - \lambda_g \frac{dn_g}{d\lambda_g}) \quad (5)$$

材料内部で測定された波長 $\lambda_g = \lambda_0 / n_c$ を用いて、波面の傾斜角度は次のように簡単化される。：

$$\frac{d\theta}{d\lambda_g} = \frac{n_g m}{n_s d}, \text{ と } m = \frac{\Delta L}{\lambda_g} \quad (6)$$

最後に、傾斜距離を $dx = L_f d\theta$ とすると、結像面での集光されたスポットの相対的な分散距離 Δx は次式となる。:

$$\Delta x = (dx/d\lambda_g) \lambda_g = L_f (d\theta/d\lambda_g) \lambda_g = \lambda_g \frac{n_g m L_f}{n_s d} \quad (7)$$

ここで、 L_f はスラブ導波路の焦点距離である。

2.2.2 自由スペクトル領域

AWG の重要な特性に FSR(自由スペクトル領域: free spectral range)がある。FSR は分波器の波長間隔としても知られている。この間隔は多くの波長が出力側のスターカップラーで干渉により強めあうということが生じるという事実に基づいている。AWG の伝達関数に周期性があり、FSR ($\Delta\lambda_{FSR}$) は干渉パタンのピーク値間の波長(周波数)空間間隔で、 n_c の材料分散を無視すると次式で表わされる。

$$\Delta\lambda_{FSR} = N\Delta\lambda \approx \lambda_0 / m \quad (8)$$

ここで、 N は波長数(周波数チャンネル数)で、 $\Delta\lambda$ は波長間隔である。

2.2.3 チャンネル間隔と焦点距離

波長のチャンネル間隔は式(9)である。

$$\Delta\lambda = \left(\frac{d\theta}{d\lambda}\right)^{-1} \Delta\theta = \frac{n_s d n_c}{m n_g} \frac{\Delta x}{L_f} \quad (9)$$

ここで、 Δx は入力と出力導波路のピッチで、 L_f スラブ導波路の焦点距離である。スターカップラーの焦点距離は $n_s = n_c$ のとき、式(10)となる。:

$$L_f = \frac{n_s d n_c}{m n_g} \frac{\Delta x}{\Delta\lambda} \approx \frac{n_s d}{m} \frac{\Delta x}{\Delta\lambda} \quad (10)$$

2.2.4 チャンネルの最大波長数

チャンネルの最大波長 N はスペクトル空間でオーダーによって波長重なりが生じないように $\Delta\lambda_{FSR} \geq N\Delta\lambda$ の関係式から、不等式(11)の関係が得られる。

$$N < n_c \lambda_0 / (n_g m \Delta\lambda) \quad (11)$$

チャンネルの最大波長数を大きくするには m は小さくしなければならないことがわかる。この特性はマッハツェンダー型干渉計(MZI)やファブリペロ(FP)型干渉計の他の合波器でも同じである。

2.3 性能パラメータ

挿入損 $L_i(dB)$ とか反射損 $L_r(dB)$ のようないくつかの共通の性能パラメータを除いて、この節では AWG 系デバイスに特化した性能パラメータについて議論する。デバイスの過剰損 $L_e(dB)$ は出力に励起されるパワー(P_j)の合計とデバイスに入力されるパワー(P_{in})を用いて式(12)で定義される。

$$L_e(dB) = -10 \log_{10} (\sum_j P_j / P_{in}) \quad (12)$$

合波器としてはクロストークとロスの均一性の2つのパラメータが評価されなければならない。クロストーク $L_c(dB)$ は信号通過チャンネルで所望の出力(P_d)と望まない出力(P_u)の比である。2つのタイプがある：1つは隣接チャンネルのクロストーク、もう1つは隣接以外のクロストークである。ロスの均一性 $L_u(dB)$ は最大出力と最小出力の比である。

$$L_c(dB) = 10 \log_{10} (P_d / P_u) \quad (13)$$

$$L_u(dB) = -10 \log_{10} (P_{d1} / P_{d2}) \quad (14)$$

ここで、AWG のクロストークはアイソレーションとしてロスの均一性は出力均一性としても評価される。

集積されたコンポーネントとしては偏波依存ロス(PDL: polarization dependent loss)とリップルの性能パラメータが評価される。PDL $L_P(dB)$ は偏波の違いによる挿入損の差である。リップル $L_R(dB)$ は一つのチャンネルでピークと谷の挿入損の差である。

$$L_P(dB) = 10 \log_{10}(P_s / P_p) \quad (15)$$

$$L_R(dB) = 10 \log_{10}(P_{d,\max} / P_{d,\min}) \quad (16)$$

3 設計とシミュレーション

3.1 全体設計

この節では AWG デバイスの一般的な設計過程を紹介する。設計経験に基づき以下のプロセスを用いた。:

- (i) 材料とデバイスの機能面から AWG のタイプを決定する。
- (ii) 解析的にデバイス性能をチェックするために、また、デバイスの可能な寸法を決めるためにまず通常の形の AWG を用いる。
- (iii) 最終設計としてテーパ型 AWG とテーパ型ポートを採用する。通常型 AWG と比較してテーパ型 AWG は、デバイス長を短くでき、テーパ領域でモード変換ができる結果として、出力の均一性と低損失性を保ち、バンド幅の改善がなされる。
- (iv) スキャン機能とデバイス解析時にもっと稠密なメッシュを使うことで AWG デバイスの細かな調整を行う。

一般的には、ユーザはデバイスモジュールで AWG の設計を行う前に材料モジュールを使って材料設計、導波路モジュールを使って導波路設計を行っていないなければならない。

AWG は直線導波路、スターカップラー、円弧からなる曲がり導波路、テーパ導波路などから構成される複雑なデバイスなので、設計者は AWG を設計するに際してこれらの個々のサブコンポーネントについてある程度知っておく必要がある。

注意: 直線導波路、スターカップラー、円弧からなる曲がり導波路、テーパ導波路などに関するもっと一般的な情報や本節で用いている記号などに関しては関連する APSS のアプリケーションノートや APSS のユーザマニュアルを参照されたい。

3.2 一般的な設計手法

上記での計算結果に基づき、簡単な設計戦略を重要な順番で以下に記す。AWG の設計に関して入念に記述されているのは参考文献[6]である。勿論、AWG デバイスの特性を決定するための多くのパラメータや数式が記載されている。本節では、この節では高度ではあるが詳細なプロセスの概略を記してある。

3.2.1 基本設計パラメータ

AWG を用いた合波器を設計するに先立ち、中心のパスバンド波長 λ_0 、ウエファァーのコアとクラッドの屈折率 n_c と n_0 導波路のコア部分の幅などの基本的なパラメータを知らなければならない。これらはアレイチャンネル部分やスラブ導波路における実効屈折率 n_s や群屈折率 n_g の評価に用いられる。そして、上記に関連したスポットサイズ ω_0 などの値を求めることができる。

3.2.2 チャンネルの波長間隔とポート数

波長多重用の合波器を設計する際にチャンネルの波長間隔 $\Delta\lambda$ と波長チャンネル数 M と N は大変重要なパラメータである。通常チャンネルの波長間隔 $\Delta\lambda$ は ITU のグリッド基準で 50 GHz、100 GHz とか 200 GHz のように設定される。チャンネルの波長数 M は WDM/DWDM のネットワークや顧客の要求から決まる。一般には二種類の AWG がある。: $1 \times N$ ($M=1$) と $N \times N$ ($M=N$) である。チャンネル波長数 N は 2 のべき乗として 16、32、64、そして、128 のように選ばれる。

3.2.3 自由スペクトル領域と回折次数

チャンネルの波長間隔 $\Delta\lambda$ と波長数 N から、自由スペクトル領域 $\Delta\lambda_{FSR}$ は容易に計算される。:

$$\Delta\lambda_{FSR} = N\Delta\lambda \quad (17)$$

そして、回折次数 m は次式となる。:

$$m < n_c \lambda_0 / [n_g N \Delta\lambda] \quad \text{または} \quad m = \text{floor}\left(\frac{\lambda_c}{\Delta\lambda_{FSR}}\right) \quad (18)$$

もっとも近い整数の底(floor)は与えられた波長間隔、波長数から中心波長を設定するのに必要である。そして、このことで FSR を少し修正するようになる。

3.2.4 アレイ導波路の光路差

隣接アレイ導波路の光路差 ΔL は式(19)となる。

$$\Delta L = m \frac{\lambda_0}{n_c} \quad (19)$$

3.2.5 ポートのピッチと位置のシフト

一般的に、AWG の合分波器(MUX/DeMUX)の設計には小型化を実現するためにはポートピッチ d と位置のシフト Δx は小さいほど良い。他方、近接する出力ポートのアイソレーションの観点からは出力導波路のギャップ (導波路間隔に対

応)は十分に大きくなければならない。ごく一般的なルールとして、このギャップは導波路幅の2倍である。出力導波路の間隔が決まると、相対的な分散 Δx は次式で計算できる。

$$\Delta x = d \lambda_0 / \Delta \lambda \quad (20)$$

ここで、 $\Delta \lambda$ は分波器のチャンネル間隔である。

3.2.6 焦点距離

回折次数が決まると焦点距離 L_f は式(21)で表わされる。

$$L_f = \frac{n_s d n_c}{m n_g} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \approx \frac{n_s d}{m} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} = \frac{n_s d}{m} \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} \quad (21)$$

3.2.7 アレイ導波路数

AWGの設計ではアレイ導波路数 P はそんなに重要なパラメータではない。というのは、 $\Delta \lambda$ や N は P に依存しないからである。一般的に、アレイ導波路数 P は開口数(NA: numerical aperture)形成に十分なように選ばれる。 P は入出力導波路数よりも大きな値として、回折してアレイ領域に入ってきた全ての光を集めることができるように設定される。およその目安として、この値はチャンネル導波路数の4倍以上である。

$$P = (4-6) * \max(M, N) \quad (22)$$

3.2.8 その他の設計パラメータ

設計では、テーパ長 L_1 、 L_3 や L_4 のように設計を最適なものにするために、まだいくつか決定しなければならないものがある。デバイスの曲がり最小半径はモードプロファイルの位相速度のエキスポネンシャル減衰項がクラッド層のものよりも小さくならないように決める。

$$\frac{c}{n_r} \frac{R + w_{\text{eff}}/2}{R} < \frac{c}{n_0}, \text{ または } R_{\min} > \frac{w_{\text{eff}}}{2} \left[\frac{n_r}{n_0} - 1 \right]^{-1} = \frac{w_{\text{eff}}}{2\Delta} \quad (23)$$

ここで n_r はコアの屈折率、 n_0 はクラッドの屈折率であり、 Δ は比屈折率差、 w_{eff} は実効的導波路幅である。閉じ込めが強い（屈折率差が大きい）曲がり導波路では小さな曲がり半径を実現できることがわかる。入出力のピッチ d_1 や d_2 はファイバの直径で決まり、シングルモードファイバでは $250\ \mu\text{m}$ などとなっている。

3.3 シミュレーションと最適化

この節では APSS デバイスモジュールを用いてシミュレーションと最適化についての概略を記す。

AWG デバイスは複雑ではあるが、親切なウィザードがデバイスモジュールでは AWG テンプレートを呼び出し、設計を支援する。デバイス設計に先立ち既に用意されている導波路情報をロードし、“Device type（デバイスタイプ）”で“AWG”を選択する。そうすると、図 2 に示すようにウィザードはデバイスポート、スターカップラー、アレイ導波路などの情報を入力するように要求してくる。

AWG Selection

Port Number of ports Left: <input type="text" value="1"/> Right: <input type="text" value="4"/>				Width <input checked="" type="radio"/> Equal <input type="radio"/> Right/Left equal <input type="radio"/> Unequal	Pitch <input checked="" type="radio"/> Equal <input type="radio"/> Right/Left equal <input type="radio"/> Unequal	Position <input checked="" type="radio"/> Symmetrical <input type="radio"/> Arbitrary
Coupler Central Shape <input type="radio"/> Rectangular <input type="radio"/> Taper <input type="radio"/> Rotman Arc <input checked="" type="radio"/> Rowland Arc				Width <input checked="" type="radio"/> Equal <input type="radio"/> Right/Left equal <input type="radio"/> Unequal	Pitch <input checked="" type="radio"/> Equal <input type="radio"/> Right/Left equal <input type="radio"/> Unequal	Taper Type Taper1: <input type="text" value="Linear"/> Taper2: <input type="text" value="Cosine"/> Taper3: <input type="text" value="Sine"/> Taper4: <input type="text" value="Parabolic"/>
<input type="checkbox"/> Symmetrical <input checked="" type="checkbox"/> Equal I/O Radius <input type="checkbox"/> Equal taper Length						
Array Number of array <input type="text" value="24"/>				Width/Pitch <input checked="" type="checkbox"/> Symmetrical <input checked="" type="checkbox"/> Equal width <input checked="" type="checkbox"/> Equal pitch	Polarization <input checked="" type="radio"/> None <input type="radio"/> Waveplate <input type="radio"/> V-shape zone	Shape <input checked="" type="radio"/> SAS <input type="radio"/> ASA

図2 . AWG デバイス設計ウィザードでのテンプレート入力パラメータ

デバイスウィザードは色んな可能性の組み合わせを提供する。以下のようなパラメータである。

- ポート (例えば、幅、位置、ピッチ、型)
- カップラー (例えば、形、幅、テーパー型)
- アレイ導波路 (例えば、形、幅、ピッチ)

AWG のカップラーには大別して二つのテーパー型がある：従来型 (矩形) とテーパー型 (関数型) である。前者の矩形については解析的なアプローチが適用できる。スターカップラーの形としては次のテーパーが考えられる：“矩形(rectangular)”，“線形(linear)”，“正弦(sine)”，“余弦(cosine)”，“パラボリック(parabolic)” または “ユーザ定義(user-defined)”。

デバイス詳細に定義された後、ユーザはシミュレーションや指定した変数でのスキャンが可能となる。シミュレーションや解析に際しては色んな解法設定がユーザに任されている。例えば、ユーザはテーパの有無や解析的手法か数値解析手法かなどの選択ができる。一般的には閉じ込めが強い AWG では多くの応用に解析手法で十分である。

ユーザは、計算結果得られた挿入損、位相差、クロストークなどの性能パラメータを表示させることができる。また、ASCII テキスト (*.txt)形式、Microsoft Excel 形式(*.xls)、ビットマップ形式 (*.bmp)のファイルフォーマットで出力可能である。更に、レイアウトマスク用に DXF と GDS-II のファイルフォーマットでエクスポート可能である。

4 実例

本節では三次元導波路の等価屈折率を用いて典型的なシリカ系の AWG の設計過程の概略を実例として取り上げた。また、設計者がいかに柔軟にシミュレーションしたりパラメータのスキャンができたり、性能指数のデバイス長、偏波、波長、ポート幅、スターカップラー幅、スターカップラーのテーパやピッチに対する感度計算ができるかを示してある。

4.1 離形デバイスの作成

前章での設計とシミュレーション概念に基づき、参考文献[7]及び[8]に示されている設計パラメータを仕様として 1×16 AWG を実例として取り上げた。

APSS を起動して、“user-input (ユーザ入力)”を選択し、“AWG”のテンプレートを選択すると、既に述べたように図 2 となる。ここでは、 $M=1$ (入力ポート数)、 $N=16$ (出力ポート数)、 $P = 60$ (アレイ導波路数)、その他の値はデフォルト値 (“Symmetrical”、“Equal”、“None” をポート、カップラー、アレイに適用)のままとした。“Next (次へ)”をクリックして必要な設計パラメータを変更する。最終

的にデバイスプロジェクトを完成させるには、“Finish（終了）”をクリックする。この事例は“D_AWG1x16x60”とファイル名をつけた。図3に示すようにその結果として等価の屈折率はコアで 1.4551、クラッドで 1.4441 となった。レイアウトと設計パラメータは図4(a), (b)のようになった。サイズは $14.5 \times 16 \text{ mm}^2$ であった。これらのパラメータを設定した後に“Refresh（リフレッシュ）”ボタンをクリックすると描画が更新される。

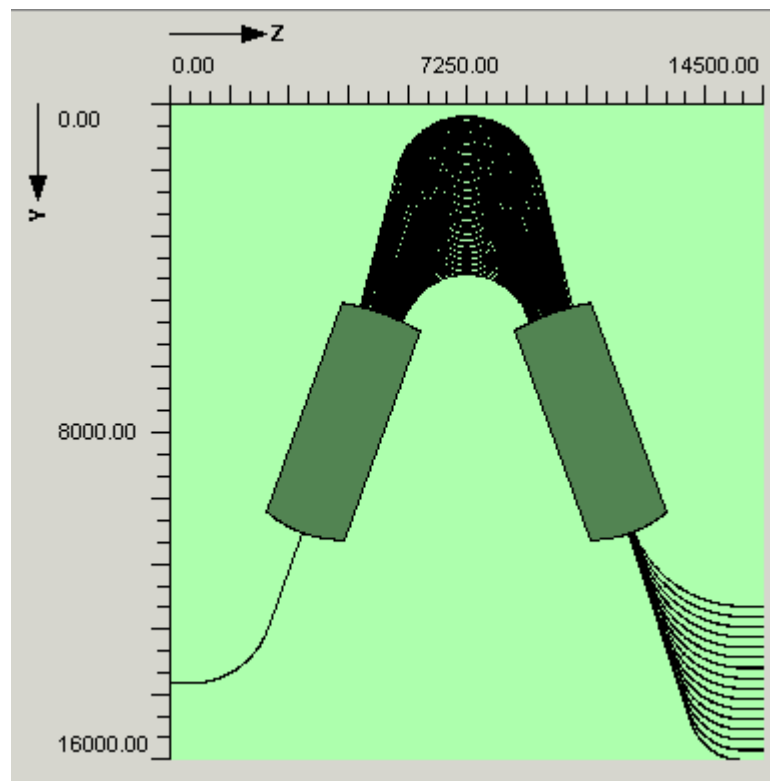
Domain	Material / Index		X Index (R)	X Index (I)	Y Index (R)	Y Index (I)
▶ Background Refractive Index	Background Refractive Index	...	Table	Table	Table	Table
▶ Core Refractive Index	Material	...	Table	Table	Table	Table

(a) オリジナルの材料パラメータ

Domain	Material / Index		X Index (R)	X Index (I)	Y Index (R)	Y Index (I)
▶ Background Refractive Index	Background Refractive Index	...	1.4442	0.0	1.4442	0.0
▶ Core Refractive Index	Material	...	1.4551	0.0	1.4551	0.0

(b) 更新された材料パラメータ

図3．16 チャンネル AWG の材料パラメータ




(a) レイアウト

Name	Variable	Expression
Left port length	L1	500.0000
Right port length	L2	531.1300
Straight length of left coupler	L3	2500.0000
Straight length of right coupler	L4	L3
Minimum radius of AWG	Rmin	1000.0000
Center radius of AWG	R	2000.0000
Distance between couplers	L	8000.0000
Coupler angle(degree)	alpha	70.0000
Focal length of couplers	Lf	5680.0000
Width of coupler	W	2000.0000
Width of port	PortW	7.0000
Pitch of the coupler	dx	20.0000
Array pitch	dd	18.5000
Straight length of shortest array	Sp	300.0000
Array path difference	dL	124.8540
Width of Array	ArrayW	7.0000
Port pitch	D	250.0000
Left region of left star	F1	300.0000
Right region of left star	F2	F1
Left region of right star	F3	F1
Right region of right star	F4	F1
Device upper offset	OS1	300.0000
Device down offset	OS2	16.7500

(b) 設計パラメータ

図 4 . 16 チャンネル AWG の(a)レイアウトと(b)設計パラメータ

4.2 テンプレートの解法設定

1×16 AWG のプロジェクトができると、シミュレーションするには、 ボタンをクリックして解法設定を入力しなければならない。図 5 は“Device Solver Setting（デバイスの解法設定）”であり、3つのタブから成っている。即ち、“General Information（一般情報）”、“Solver Selection（解法の選択）”と“Variable Selection（変数選択）”である。

“General Information（一般情報）”タブでは、所望の“Polarization（偏波）”を選択し、“Port Information Based on Effective Index Values（実効屈折率に基づくポート情報）”や“Single Mode Width（シングルモード幅）”、および“View Mode Profile（モードプロファイルを見る）”でポートのプロファイルをチェックすることができる。

“Solver Selection (解法の選択)”タブでは、図 5 に示したように、“S parameter (S パラメータ)”が “Field (フィールド)”の出力を選択 することができる。もし、“S parameter (S パラメータ)”が選択されると解析手法か数値解析手法かを次に選択する。プログラムでは次のようになっている。

- 第二のスターカップラーのフィールド分布のみモニタ可能
- テーパー型 AWG では数値解析手法のみ有効(the mesh setting option under “Advanced Setting (高緯度な設定)”でのメッシュ設定オプションでは2つのスターカップラーの領域長さは $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ と $F4$ で定義される。)
- 現在の AWG は 2 次元解析のみ

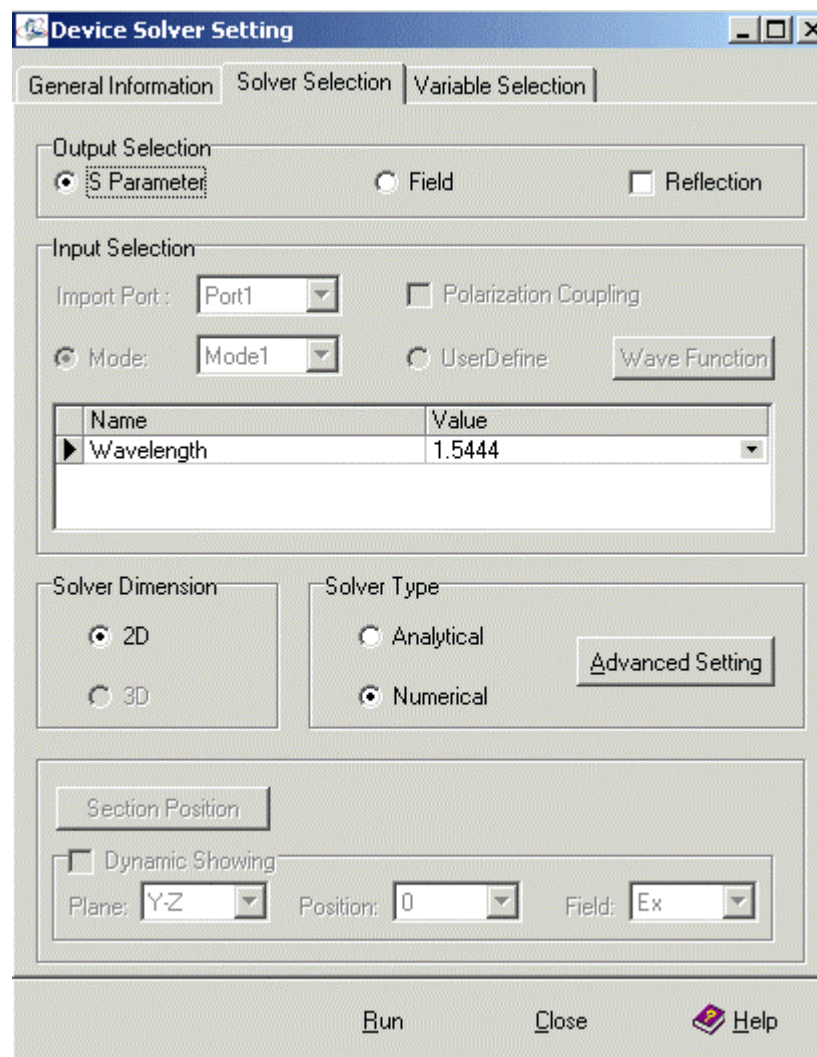




図 5 . AWG 合波器のデバイス解法の設定

“Device Solver Setting (デバイスの解法設定)” のタブでは変数スキャンに対しては変数を選択しなければならない。また、選んだパラメータに対しては“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できるパラメータ数は最大 2 つである。

4.3 実行と表示

解法設定を行った後、S パラメータやフィールドの計算をするには “Run (実行)” ボタンをクリックする。シミュレーションが終わったならば、 または  ボタンをクリックすると、S パラメータや“Section Position (選択位置)” の電磁界分布を表示させることができる。図 6 は第 2 のスターカップラーでの X-Z 平面でのフィールド分布である。

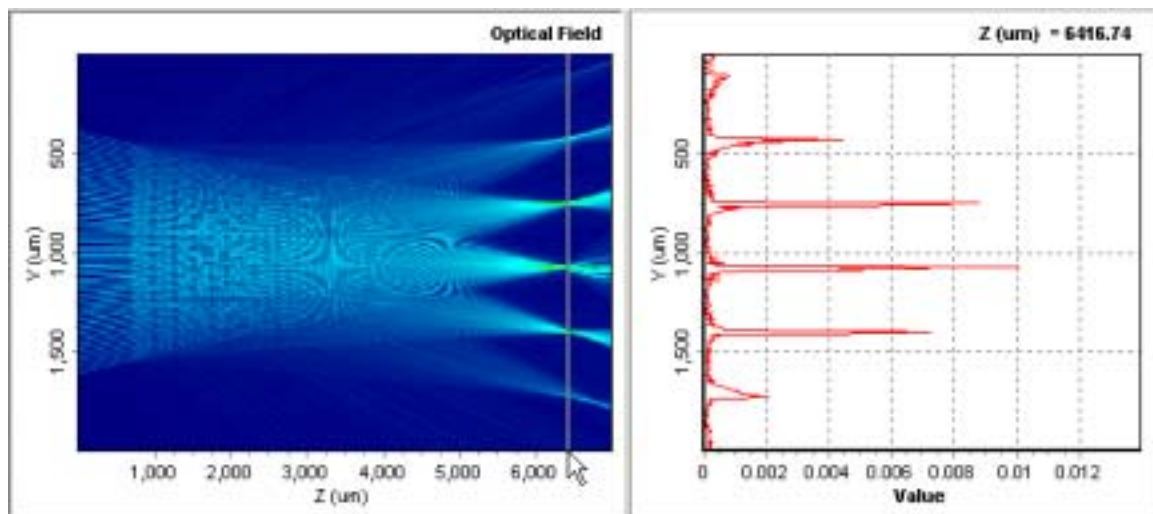


図 6 . 第 2 のカップラーでのフィールド分布の表示

最終段階として、波長を変化させてスペクトル応答特性を計算した。この例では波長ステップとして 0.2 nm を選択した。図 7 に計算の結果得られたスペクトル特性を示す。

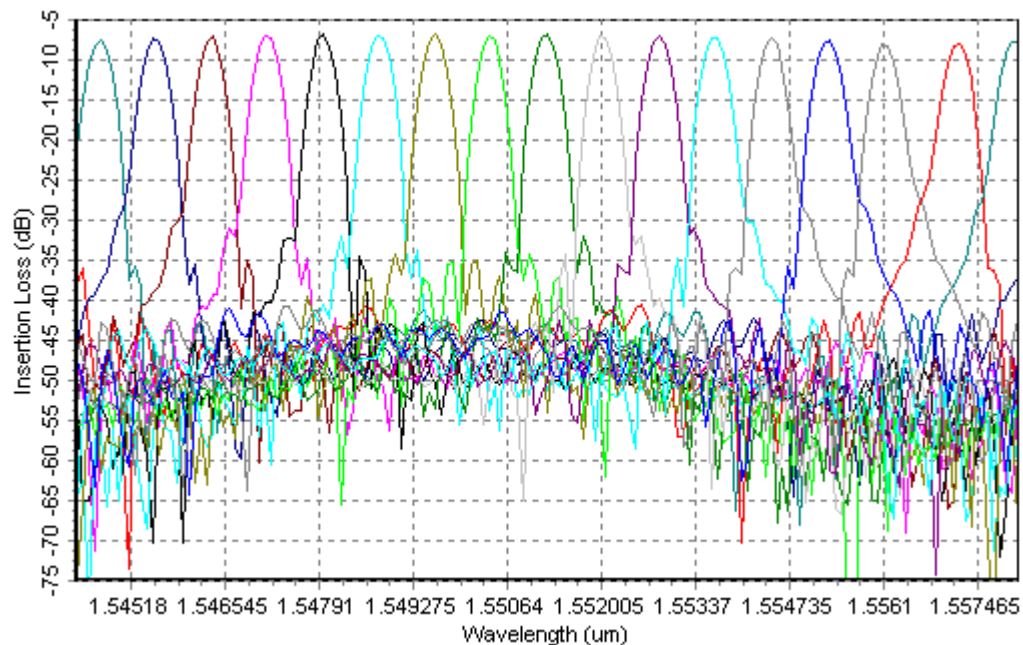


図7 . 1×16 AWG のスペクトル特性の計算結果

5 議論

本節では APSS デバイスモジュールを用いて AWG を設計する際の重要な事項について議論する。APSS には AWG をどのように設計するかをユーザに理解してもらいために実例のファイルが含まれている。

5.1 偏波

実際の AWG ではストレスによる複屈折率によって等価屈折率が TE と TM モードで異なるために、偏波に依存して焦点位置が異なる。また、PDL (偏波依存損失) が生じることになる。実際の通信への応用を考えると PDL は 0.5 dB 以下で無ければならない。AWG の偏波依存性を無くするにはいくつかの方法が報告されている[7]。アレイ導波路の中心に薄い半波長板を挿入することで TE/TM モード変換を行う方法が簡単で最も良く用いられる方法である。

5.2 挿入損

WDM 通信では AWG にはファイバとファイバの間に利用されるので低ロスであることが要求される。AWG の挿入損の主な要因は：

- 曲がり導波路の伝搬損
- ファイバと導波路間の結合損
- スターカップラーとアレイ導波路間のトランジション損失
- シリカの材料に依存する散乱損

実際には、大きな半径とテーパー領域（水平、垂直方向）を設けることで曲がり損失を無視できる程度に減少できる。研究段階では 2.3–2.7 dB 程度のロスであるとの報告が成されている。商用品としてはガウス型の通過バンド AWG で 4.5 dB の損失、フラットトップ型の AWG で 7.0 dB の損失である。

5.3 クロストーク

レビュー論文[4]によるとクロストークが生じる多くのメカニズムがある。6 つのソースとして、受信器のクロストーク、切り捨て誤差、モード変換、アレイとの結合、位相伝搬の非干渉性、バックグラウンドの放射がある。

最もはっきりとしたクロストークはスターカップラーの受信側に起因するものである。伝搬フィールドのテイル部分と導波路のモードとの重なり積分によってクロストークは容易に計算できる。

もう一つの原因は伝搬しているフィールドを有限幅の出力アレイの口径で受ける際の打ち切り誤差によるものである。この切捨てによってエネルギー損失が起こり、出力の焦点したフィールドのサイドローブレベルが増加する。十分に低いクロストークとするには、AWG ではフィールドのガウス幅の 2 倍以上の開口とす

ればよい。この要求が満たされると打ち切りによるクロストークは -35dB 以下となる。

モード変換によるクロストークはマルチモード接合のゴースト(ghost) イメージに起因する。1 次モードの励起を抑えるように接合のオフセットを最適化することでこのクロストークは低減できる。

アレイによる結合のクロストークを低減するにはアレイ導波路の距離を離すことで解決できる。しかし、製造の不完全さから生じるフェイズドアレイの非コヒレンス性から（何千波長という間に）光路長変化が生じて、かなりの位相エラーとなりその結果としてクロストークが増加してしまう。このため実際には AWG デバイスのクロストーク低減は製造技術が完璧ではないことによって制約が生じる。

5.4 フラットトップ応答

波長の制御性が緩和できるので多くの応用面ではフラットトップ型パスバンドは重要である。この目的を実現するにはいくつかの方法がある。最も簡単な方法は AWG の受信側でマルチモードの導波路を使うことである。焦点が広い導波路に沿って移動するとほとんど 100%の光が受信側で結合し周波数応答としてフラットなものになる。この手法で 1 dB のバンド幅は 31%のチャンネル幅から 65%へと容易に改善される。他の方法は、スターカップラーの送信導波路炉の最終位置に MMI の短いパワースプリッターまたは Y ジャンクション（2 つの出力分岐が互いに接近しているもの）を使うものである。そのようなデバイスの動作原理は導波路の単一モードをダブル（駱駝の瘤のように）イメージに変換する。その結果として AWG は 1 対 1 のイメージシステムなので周波数応答が平坦化される。

5.5 熱制御/微調整

AWG を実際の光通信に利用するためには精度の良い波長制御と長期に渡る波長の安定性が要求される。勿論、チャンネル波長は AWG の周辺温度が変動すると、用いられている材料の熱係数に基づいて変化する。熱光学 (TO: thermo-optic) 効果を利用して、AWG の中に ITU グリッドをはじめ所望の波長設定ができるような温度制御を作り込むことができる。

6 まとめ

実例で示したように、APSS は便利で効率的な AWG デバイスの設計やシミュレーションを提供する。これは、APSS デバイスモジュールで用意されている知識ベースの AWG テンプレートによって容易に機能設計ができるためである。AWG デバイスの理論と動作原理についても述べた。最後に、設計プロセスを紹介すると共に、シミュレーション結果が実験結果と良く一致することについても記した。

7 参考文献

- [1] A. R. Vellekoop and M. K. Smit, "Four channel integrated-optic wavelength multiplexer with weak polarization dependence," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, pp. 310-314, March 1991.
- [2] C. Dragone, "An NxN optical multiplexer using a planar arrangement of two star couplers," *IEEE Phot. Techn. Lett.*, vol. 3, pp. 812-815, Sept. 1991.
- [3] E. S. Koteles, "Integrated planar waveguide demultiplexers for high density WDM applications," *Fiber and Integrated Optics*, vol.18, pp. 211-244, 1999.
- [4] M. K. Smit and C. van Dam, "PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Applications", *IEEE J. of Sel. Topics in Q.E.*, vol. 2, pp. 236-250, June 1996.
- [5] A. Kaneko et al, "Recent progress on AWGs for DWDM applications," *IEICE trans. Vol.E83-C*, 860-868, June 2000.

- [6] H. Takahashi, "Arrayed waveguide grating for wavelength division multiplexer with nanometer resolution," *Electron. Lett.*, vol. 26, pp. 87-88, 1990.
- [7] Y. Inoue, H. Takahashi, and et al: "Elimination of polarization sensitivity in silica-based wavelength division multiplexer using a polyimide half waveplate," *J. Lightwave Technol.*, vol.15, no.3, pp1947-1957, Oct. 1997.
- [8] K. Okamoto, *Fundamentals of optical waveguides*, New York: Academic, pp. 359, 2000.