

RSOFTによるナノ構造のモスアイ反射防止膜の最適化

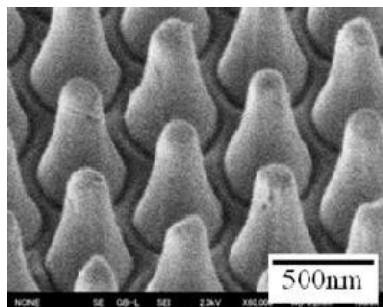


モスアイ反射防止構造

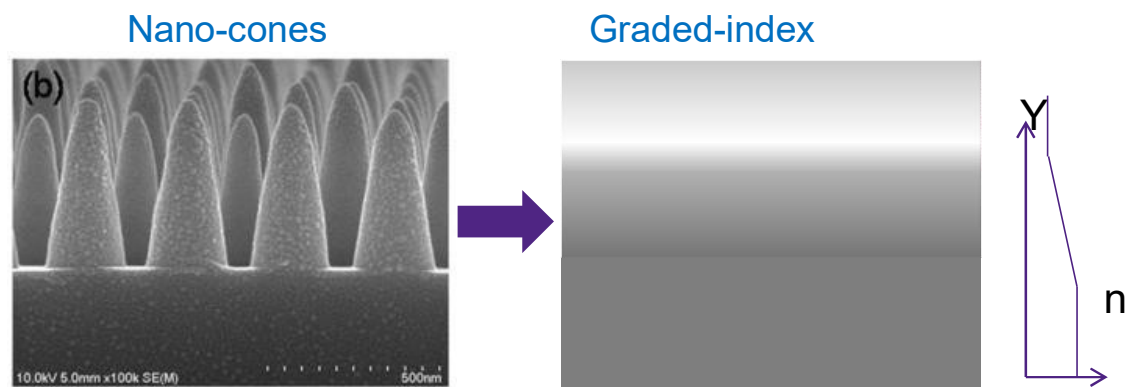
光学界面の表面に形成されるマイクロスケールの構造は、フレネル反射を低減する有効な方法として1世紀以上前から知られています。

蛾の目は、天然のナノ構造反射防止膜で覆われています。

- モスアイパターンは、サブ波長の「凹凸」パターンで、空気と媒質の間に有効な屈折率勾配を作り出すことで反射を低減します。
- モスアイ構造は、反射を低減させる最も有効なナノ構造の一つです。



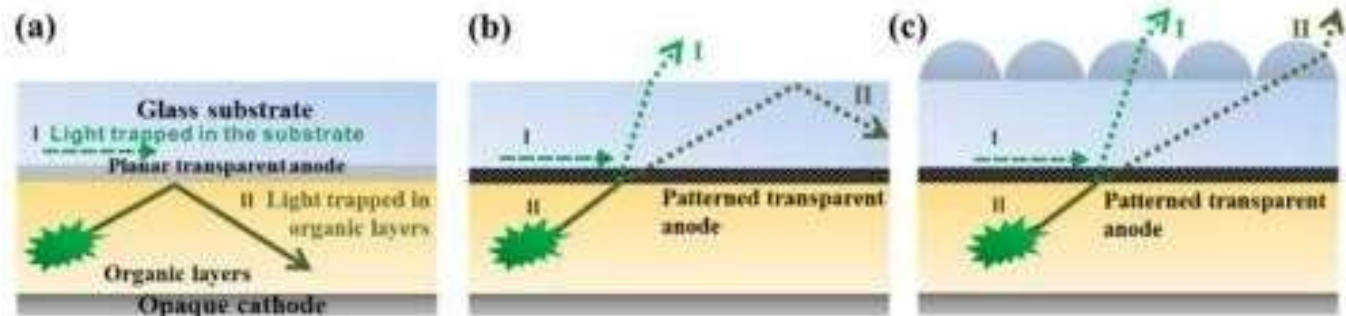
T. Kondo, *et al*, Proc. of SPIE Vol. 7602 (2010) 76021M-1



[1] Ou, Qing-Dong, et al., *Advanced Optical Materials* 3.1 (2015): 87-94.

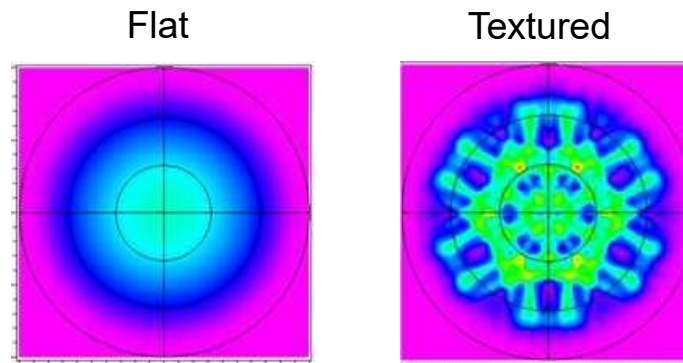
モスアイ反射防止構造の応用例

- モスアイナノ構造体を表面にパターン化し、反射防止特性を付与することができます。
- モスアイ構造は、従来の薄膜ARコーティングと比較して、以下のような利点があります。
 - 環境耐性
 - 表面密着性
 - 単一材料による制作
 - 最小限の表面処理
 - 高いレーザー誘起損傷閾値
 - セルフクリーニング(ロータス効果)
- モスアイ構造は、屈折率差の大きい材料からの反射を低減し、材料間の透過率を高めるために特に有効です。
 - 高出力・低損失のアプリケーションで特に重要
- モスアイAR構造は、レーザーシステム、太陽光発電、LED、電子ディスプレイ、光ファイバーなど、多くのアプリケーションで使用されています。



モスアイパターンは、内部全反射を分解することで有機ELからの取り出し効率を高めることができます

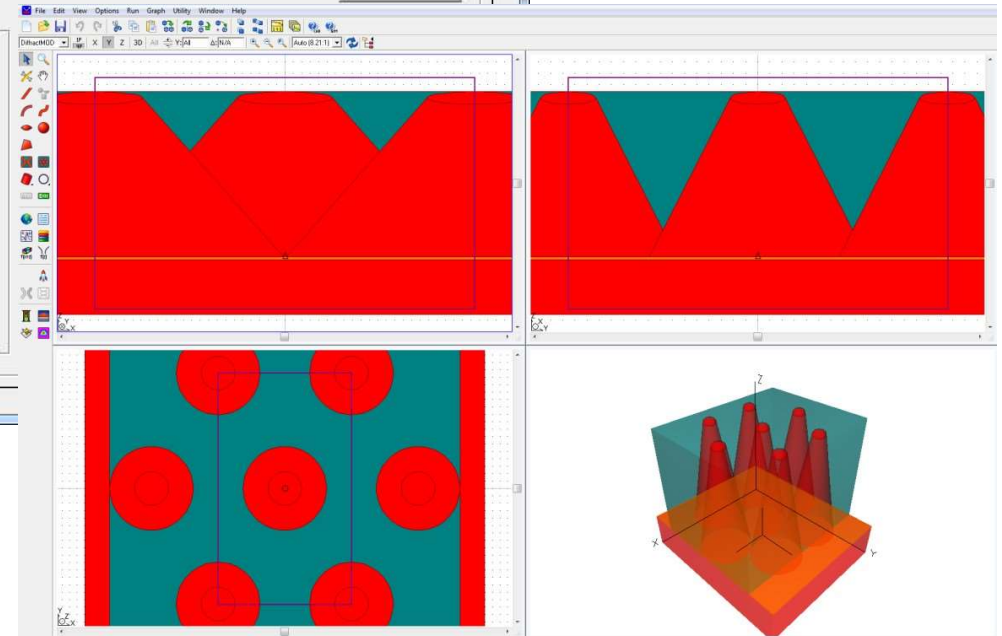
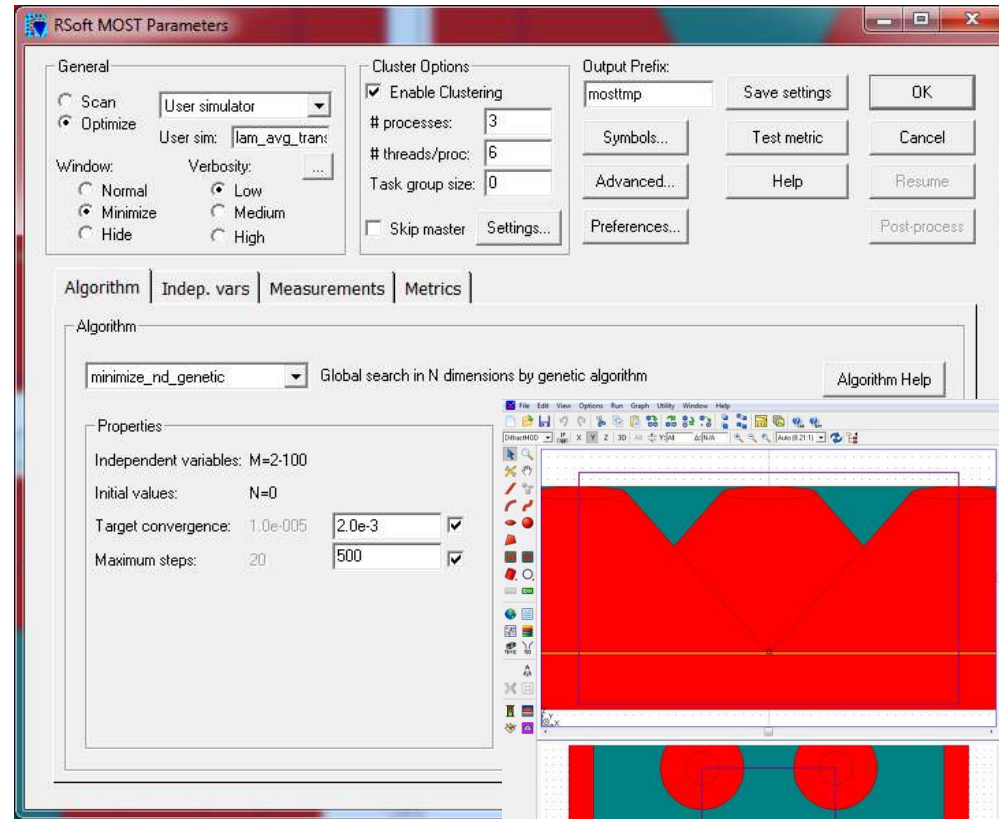
ファーフールドプロット



Ou, Qing-Dong, et al.,
Advanced Optical Materials 3.1 (2015):
 87-94.

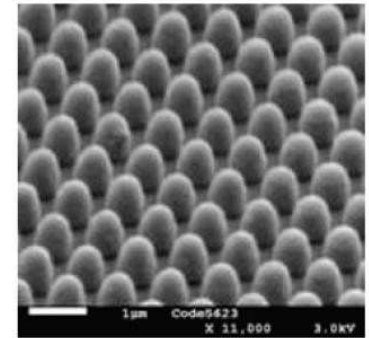
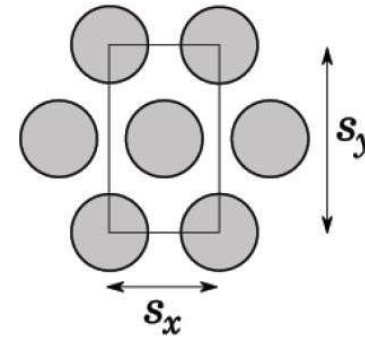
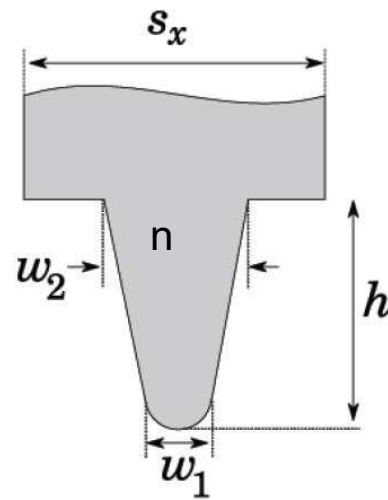
As_2S_3 光ファイバー用モスアイ反射防止構造のデザイン

- ・ モスアイ構造の形状と寸法を最適化し、 As_2S_3 ($n=2.45$) カルコゲナイド光ファイバの端面を介して最大出力結合を実現しました。
- ・ FDTDやRCWAのような、厳密な電磁波伝搬計算手法を用いることで、モスアイ表面からの透過/反射を正確にシミュレーションすることができます。
-この特殊なモスアイ構造では、FDTDよりもRCWAの方が高速であるため、RSoft Photonic Device ToolsのDiffractMOD RCWAが使用されています。
- ・ RSoftのMOST Optimizer および MOST Scanner は、DiffractMODと組み合わせて、モスアイ反射防止パターンの反射/透過を最適化するために使用されています。



モスアイ反射防止構造パラメータ

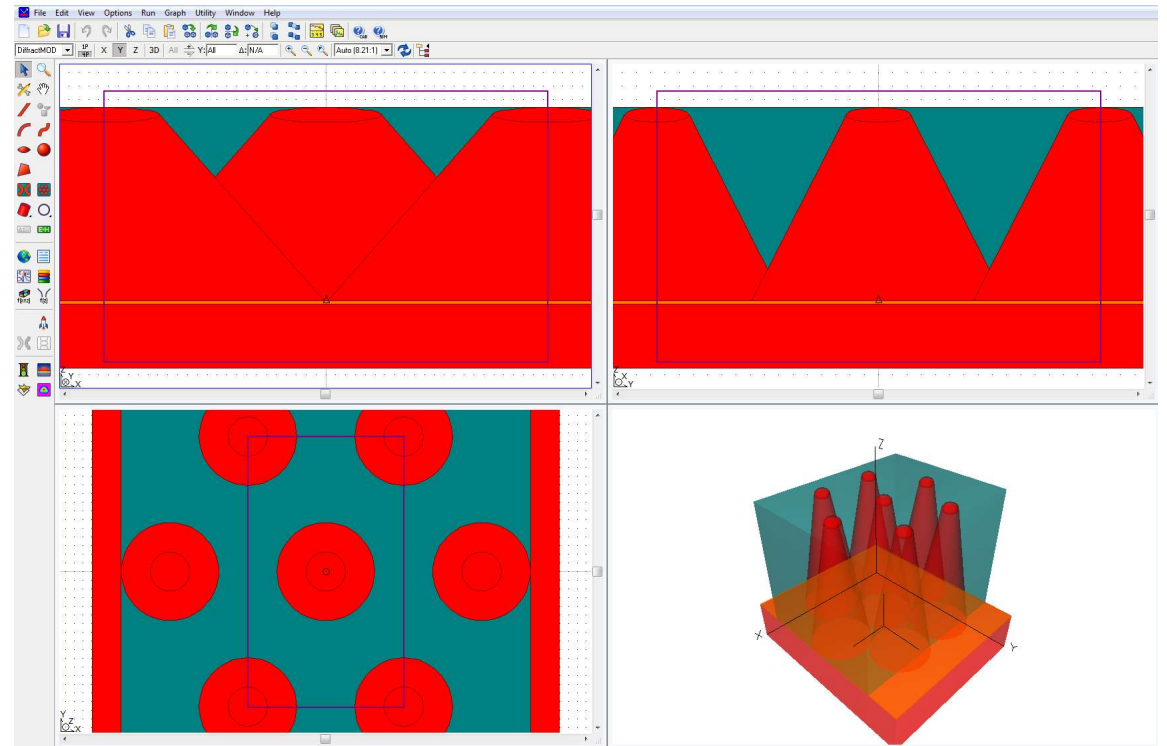
Parameter	Definition
H	モスアイコーンの高さ
W1	コーン上部の直径
W2	コーン底部の直径
Lattice	六方晶
Sx	Lattice packing constant
Sy	$\sqrt{3}Sx$
N	2.45 (As_2S_3)
波長	2-5um



R. J. Weiblen et. al [1]

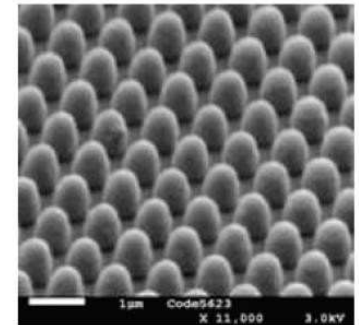
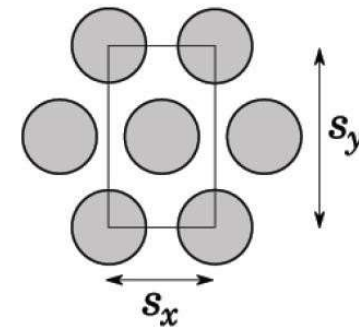
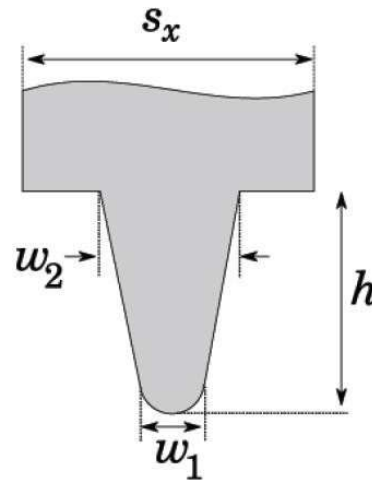
シミュレーションパラメータ

- 光源は平面波で、モスアイ面の下から入射します。
- DiffractMODのシミュレーションで使われるindex resolutionとharmonics数は透過/反射率結果になるよう選択されています。
- 周期的な境界条件を持つモスアイ構造の単一ユニットセルを使用して、モスアイの周期構造を再現しています。
- 円対称の構造体で正方形または六角形の周期構造で垂直入射の条件では、入射光は単一偏光を検討で十分です[2,3]。



パラメータスキャン

- MOST最適化検討を始める前に、MOSTを使用してパラメータスキャンを行うことが非常に有用です。
 - シミュレーションの検証を最も迅速に行うことができます。
 - 最適化検討のセットアップ時に、時間のかかるミスを防ぐことができます。
- この構造では、以下のようなパラメータを調査することができます
 - Tip width (W_1)
 - Base width (W_2)
 - Height (H)
 - Lattice Period ($S_x, S_y = \sqrt{3}S_x$)

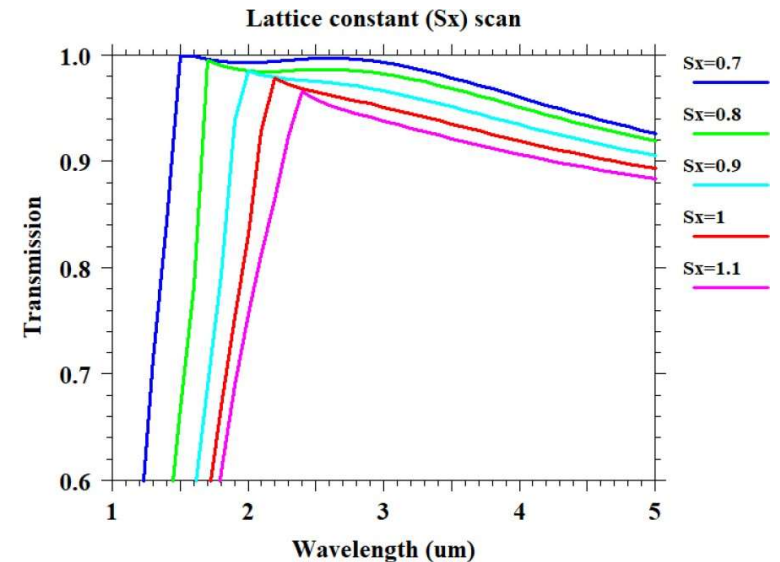
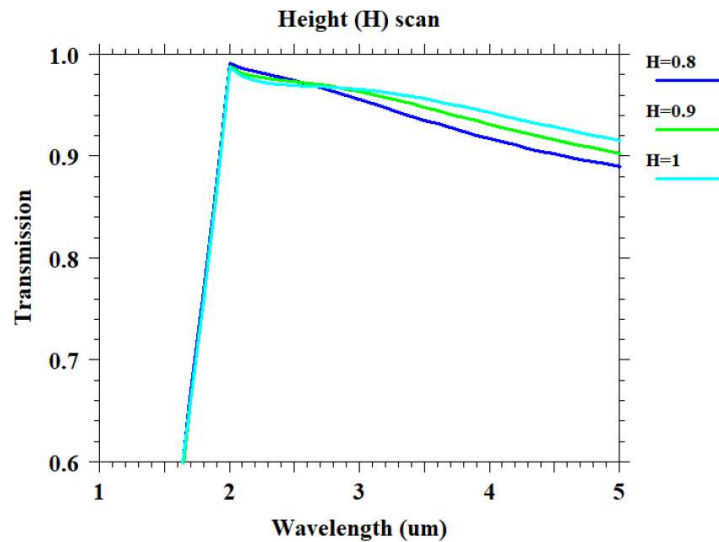
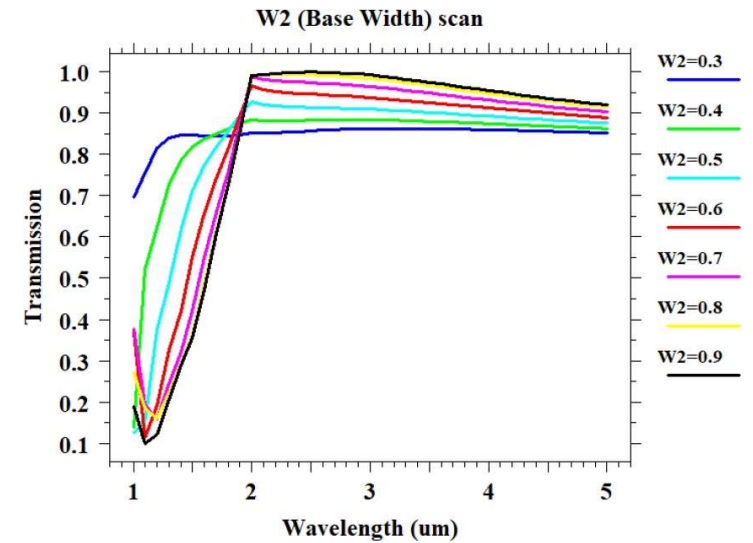
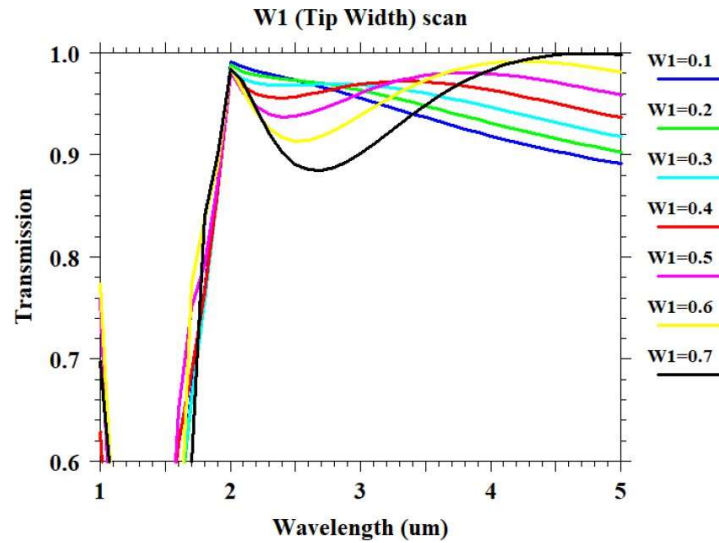


R. J. Weiblen et. al [1]

パラメータスキャン

- DiffractMODとMOSTは、さまざまな個別のシミュレーションパラメータについて、モスアイ透過率と波長の関係を効率的に計算します。
- W1、W2、H、Sxのパラメータスキャンは、過去の実験結果および理論結果と良い一致を示しています。[1]
- シミュレーションパラメータ(スキャンしない場合)は:

パラメータ	値
W1	0.2um
W2	0.7um
Sx	0.92um
Sy	1.59um
H	0.9um



パラメーター最適化

- ここでは、2～5 μm の平均透過率が最大となるように、モスアイ構造の設計パラメータを最適化します。
- DiffractMODをシミュレーションエンジンとし、MOSTの最適化機能を使用します。
- 最適化を制御するために、MOSTの「User Simulator」が使用されています。User Simulatorは、以下のタスクを実行します。
 - DiffractMOD シミュレーションの実行
 - DiffractMODシミュレーション結果から平均化された透過率(2-5 μm)を計算
 - 平均透過率を目標指標(target metric)として、User SimulatorはMOSTの遺伝的最適化アルゴリズムを用いて、最大透過率(最小反射率)が達成されるまで構造パラメータを変化

User Simulator

- この最適化のためのUser Simulator (lam_avg_trans.py)はPythonで書かれています、任意のスクリプト言語を使用することが可能です。
- このUser Simulatorは、RSoftの標準的なUser Simulatorの呼び出し規則とシンタックスに従います。
- User Simulatorは、2-5 μ mの平均化された透過率をlam_avg_transとして計算します。
- 1-lam_avg_transをMOSTのmetricとして使用します。

The image shows the RSoft MOST Parameters dialog box and a code editor. The dialog box is titled "RSoft MOST Parameters" and has several tabs: "General", "Cluster Options", "Output Prefix", "Algorithm", "Indep. vars", "Measurements", and "Metrics". The "General" tab is selected, and the "Optimize" radio button is chosen. The "User sim:" field is set to "lam_avg_trans". The "Cluster Options" section has "Enable Clustering" checked. The "Output Prefix" is set to "mostmp". The "Algorithm" tab is selected, and the "Metric - scalars derived from measurements" section is open, showing a table with one entry: "Transmission" with an active status of "Y", type of "Expression", and expression of "1-lam_avg_trans". The code editor shows the Python script "lam_avg_trans.py" with the following code:

```
1 # Import required libraries
2 import sys
3 import os
4 import rsoft.rspytools as rspy
5 from lam_avg_trans_calc import lam_avg_trans_calc #imports wavelength averaging code
6
7
8 # Parse standard user simulator command line into:
9 # minusopts
10 # indfile
11 # symscmd
12 # prefix
13 # tail_args
14 (minusopts,indfile,symscmd,prefix,tail_args)=rspy.parse_usersim_args(sys.argv)
15
16 # Determine executable name of simulation tool depending on OS type
17 if os.name=='posix':
18     sim_tool='xdfmod' #Linux
19 else:
20     sim_tool='dfmod.exe' #Windows
21
22 # Build the basic command, without the prefix so we can override it later:
23 # <sim_tool> <minusopts> <indfile> @<symsfile> <tail_args>
24 # All other commands will add additional arguments to the end of this command
```

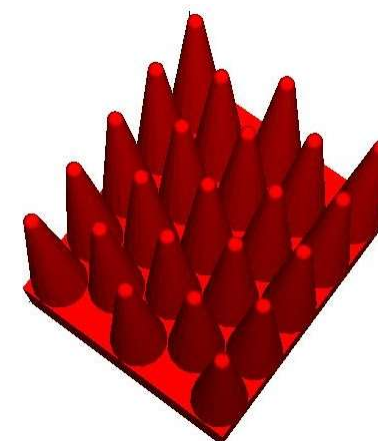
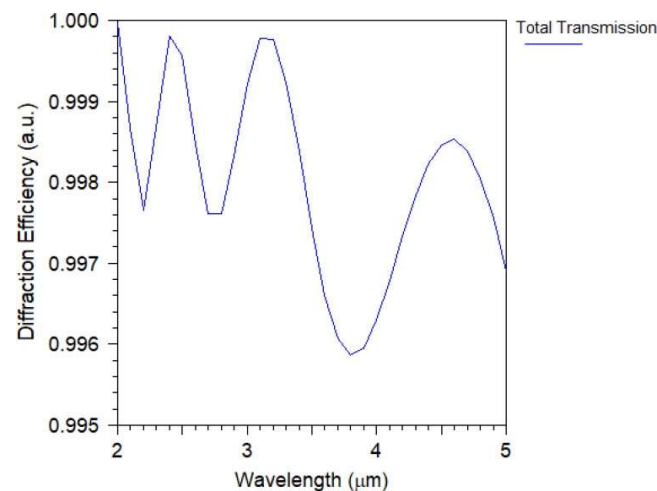
最適化結果

- 最適化速度を上げるために、W2はSxと等しくなるように設定されています。

–グレーデッドインデックスモデルによる、最大透過率を得るために必要なW2の理論的予想と一致します

- 最適化された構造は右図のとおりで、2-5umで平均99.804%の透過率となっています。

パラメータ	最適化された (定義された) 値	最適化範囲
H	2.973451636	$0.8 \leq H \leq 3\mu\text{m}$
W1	0.2263061559	$0 \leq W1 \leq 0.7\mu\text{m}$
W2	Sx	
Lattice	六方晶	
Sx	0.8980307418	$0.7 \leq Sx \leq 0.9 \mu\text{m}$
Sy	$\sqrt{3Sx}$	
N	2.45 (As_2S_3)	
Operating Wavelength	2-5um	



レファレンス

- 1 R. J. Weiblen, C. R. Menyuk, L. E. Busse, L. B. Shaw, J. S. Sanghera, and I. D. Aggarwal, "Optimized moth-eye anti-reflective structures for As_2S_3 chalcogenide optical fibers," *Opt. Express* 24, 10172-10187 (2016)
- 2 Daniel H. Raguin and G. Michael Morris, "Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region," *Appl. Opt.* 32, 1154-1167 (1993)
- 3 M. J. Steel, T. P. White, C. Martijn de Sterke, R. C. McPhedran, and L. C. Botten, "Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers," *Opt. Lett.* 26, 488-490 (2001)