

COMSOL Multiphysics Ver.5.2 専門モジュールイントロダクション

プラズマモジュール

低温、非平衡放電のモデル化ソフトウェア

計測エンジニアリングシステム株式会社
東京都千代田区内神田 1-9-5 井門内神田ビル
2015.11.24

1. プラズマモジュールの概要

出典：<https://www.comsol.jp/plasma-module>

低温プラズマソースとシステムのシミュレーション専用

プラズマモジュールは、低温温度プラズマソースとシステムのモデル化専用です。技術者や科学者はこのモジュールで放電の物理特性を調べ、既存の電位設計の性能を評価します。このモジュールでは、あらゆる空間次元（1次元、2次元、3次元）を解析できます。プラズマシステムは、特にその性質上、非線形度の高い複雑なシステムです。電気入力やプラズマ化学の小さな変化は、放電特性における大きな変化として現れます。

プラズマ - 重要なマルチフィジックスシステム

低温プラズマは、流体力学、反応工学、物理的力学、伝熱、質量移動、電磁を融合したものであり、いわば重要なマルチフィジックスシステムであると言えます。プラズマモジュールは、さまざまな工学分野で発生する非平衡放電をモデル化するための特殊なツールです。プラズマモジュールは、任意のシステムをモデル化できるフィジックスインタフェースのスイートで構成されています。これらインタフェースにより、直流放電、誘導結合されたプラズマ、マイクロ波プラズマなどの現象のモデル化をサポートしています。プラズマモジュールには、文書化されたサンプルモデル、モデル化プロセスのステップバイステップの解説、ユーザーガイドが同梱になっています。

誘導結合プラズマ

誘導結合プラズマ（ICP）は、被膜装置で熱プラズマとして 1960 年代に使用されたのが最初です。これらの装置は、ほぼ 0.1 atm の圧力で動作し、生産される気体の温度は約 10,000 K です。1990 年代に、ICP は大量の半導体ウエハー加工手段としてフィルム現像業界で評判になりました。これらのプラズマは 0.002~1 トールという低圧力の枠組みで動作し、その結果として気体温度は室温近くに保たれます。低圧力 ICP では、大きな体積に対して比較的均質なプラズマ密度が得られるので魅力的です。プラズマ密度は約 10^{18} $1/m^3$ で非常に高く、ウエハーの表面に有意なイオン流束を生じます。プラズマと駆動コイル間の容量結合の影響を抑えるため、多くはファラデーシールドを追加します。誘導結合プラズマインタフェースは電子と、このタイプのプラズマで見られる高周波数電磁場の間の複雑な連成を自動的にセットアップします。

直流放電

直流 (DC) 放電のモデル化には、特殊なフィジックスインタフェースを用意しています。この放電は、イオン衝撃による陰極の二次電子放出の間、持続します。このインタフェースでは、モデル入力が可能であり、この現象のモデル化に必要な基本方程式と条件があります。陰極から放出される電子は、陰極の降下領域で加速されほとんどがプラズマになります。プラズマは背景気体をイオン化できるだけの十分なエネルギーを得て、新しい電子-イオンのペアを作成します。電子は陽極に流れ、一方イオンは陰極に移動し、そこでイオンは新しい二次電子を作成します。二次電子放出がないと DC 放電は維持できません。

マイクロ波プラズマ

マイクロ波による加熱放電のモデル化には、マイクロ波プラズマインタフェースを使用できます。電磁波がプラズマを通過してプラズマから電子が十分なエネルギーを得ることができるときに加熱放電は維持されます。TE モード (面外の電界) または TM モード (面内の電界) のいずれかで伝播しているかによってマイクロ波プラズマの物理特性は大きく異なります。いずれの場合も、電磁波はプラズマの領域まで貫通できず、そこで電子密度は臨界電子密度 (アルゴンの場合 2.45 GHz で約 $7.6 \times 10^{16} \text{ 1/m}^3$) を超えます。マイクロ波プラズマの圧力範囲は極めて広範です。電子サイクロトロン共鳴 (ECR) プラズマの場合、圧力はほぼ 1 Pa 以下です。非 ECR プラズマの場合、圧力は、通常、100 Pa から最高で大気圧です。出力は数ワットから、最高で数キロワットです。マイクロ波プラズマは、マイクロ波電力が安く入手できるため人気があります。

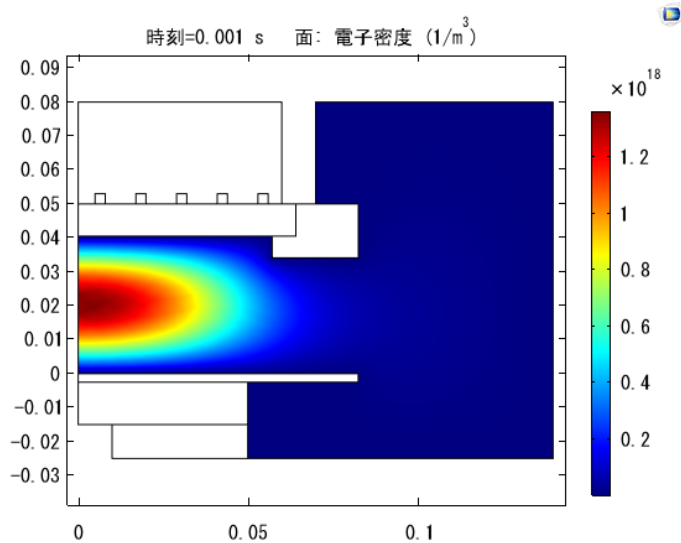
2. チュートリアル

プラズマ反応器 GEC 参照セル中アルゴン放電

出典：INTRODUCTION TO Plasma Module p.22 以降

誘導結合プラズマの周波数過渡解析を行います。

高周波電磁場の計算を周波数ドメインに行いますが、その他の変数の計算を全て時間ドメインに行います。



手順

モデルウィザード

1. デスクトップの **COMSOL** アイコンをダブルクリックします。ソフトウェアが起動すると画面にモデルウィザードを使う（**COMSOL** モデルを新規作成）かブランクモデルを使う（手動で **COMSOL** モデルを新規作成）かを選択する画面が表示されます。ここではモデルウィザードを選択します。**COMSOL** がすでに起動している場合にはファイルメニューで新規を選択後にモデルウィザードを選択します。



2. 空間次元を選択ウィンドウで2D軸対称をクリックします。

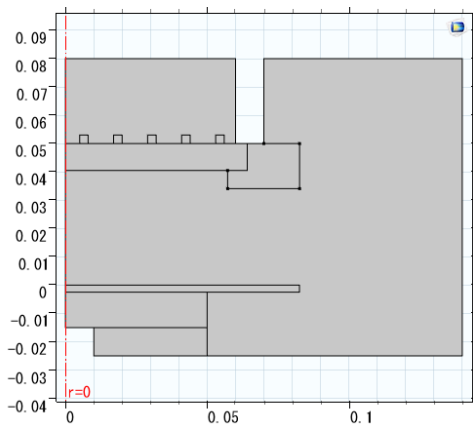
3. フィジックスを選択ツリーでプラズマを展開し誘導結合プラズマをダブルクリックします。すると、追加フィジックス選択リストに表示されます。別の方法として、誘導結合プラズマを選択し、追加ボタンを押す方法があります。

4. スタディをクリックします。

5. プリセットスタディの下のスタディツリーで周波数過渡を選択します。
6. 完了をクリックします。

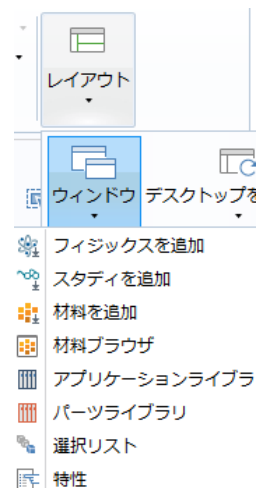
ジオメトリ

1. ホームツールバー上でジオメトリ>インポートボタンをクリックし、設定ウィンドウで参照ボタンをクリックします。
2. アプリケーションライブラリフォルダに¥Plasma_Module¥Inductively_Coupled_Plasmas をブラウズし、argon_gec_icp.mphbin を選択して開くボタンをクリックします。インポートボタンをクリックします。

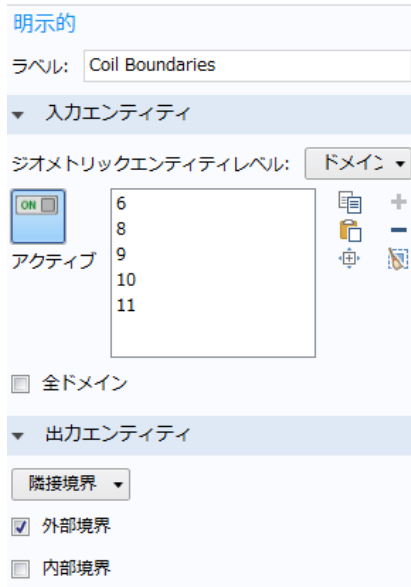


ジオメトリ区分およびパラメータ

1. 定義ツールバー上で明示的ボタンをクリックします。設定ウィンドウでラベルに **Walls** を入力します。
2. ジオメトリックエンティティレベルを境界に変更し、ホームツールバー上で>レイアウト>ウィンドウズ>選択リストを選び、境界番号 6、8、35-38、44、45、および 51-56 を選択します。
3. 定義ツールバー上で明示的ボタンをクリックします。設定ウィンドウでラベルに **Coils** を入力します。
4. ホームツールバー上でレイアウト>ウィンドウズ>選択リストを選び、ドメイン番号 6 および 8-11 を選択します。
5. 定義ツールバー上で明示的ボタンをクリックします。設定ウィンドウでラベルに **Coil Boundaries** を入力します。



6. ホームツールバー上でレイアウト>ウィンドウズ>選択リストを選び、ドメイン番号 6 および 8-11 を選択します。出力エンティティに隣接境界を選びます。



7. ホームツールバー上で定義>パラメータをクリックします。以下のパラメータを入力します。

パラメータ

名前	式	値	説明
Psp	1500[W]	1500 W	Power input
mueN	4E24[1/(V*m*s)]	4E24 1/(V*m*s)	Reduced electron mobility
T0	300[K]	300 K	Gas temperature
p0	0.02[torr]	2.6664 Pa	Gas pressure

誘導結合プラズマ

誘導結合プラズマノード をクリックし、設定ウィンドウのプラズマ特性>換算電子輸送特性にチェックを入れます。ドメイン選択にドメイン番号 3-6 および 8-12 を選択します。

電子衝突断面積

1. フィジックスツールバー>グローバルをクリックし、断面インポートを選択します。
2. 設定ウィンドウで参照ボタンをクリックし、Ar_xsecs を選択し開くボタンをクリックします。

磁場

1. フィジックスツールバー>ドメインをクリックし、磁場>アンペールの法則を選択します。
2. 設定ウィンドウでドメイン 4-6 および 8-1 2 を設定します。

化学反応

1. フィジックスツールバー>ドメインをクリックし、重化学種輸送>反応を選択します。
2. 設定ウィンドウで式に $\text{Ars}+\text{Ars}=\text{e}+\text{Ar}+\text{Ar}+$ を入力し、反応タイプを非可逆にして順反応速度定数 k^f に 3.734E8 を設定します。
3. フィジックスツールバー>ドメインをクリックし、重化学種輸送>反応を選択します。
4. 反応の設定ウィンドウで式に $\text{Ars}+\text{Ar}=\text{Ar}+\text{Ar}$ を入力し、反応タイプを非可逆にして順反応速度定数 k^f に 1807 を設定します。

化学種

1. Species : Ar ノード をクリックし、設定ウィンドウで「質量拘束を参照」にチェックを入れます。
2. Species : Ar+ ノード をクリックし、設定ウィンドウで「電気的中性拘束による初期値」にチェックを入れます。

初期値

1. 誘導結合プラズマ>初期値 1 をクリックし、初期電子密度に $1\text{E}15[1/\text{m}^3]$ 、初期平均電子エネルギーに 5[V] を設定します。

コイルグループドメイン

1. フィジックスツールバー>ドメインをクリックし、磁場>コイルグループドメインを選択します。
2. 設定ウィンドウでドメイン選択を Coils に変更し、コイル励振をパワーにして Psp を入力します。

プラズマモデル

1. プラズマモデル 1 ノード をクリックします。
2. 設定ウィンドウのモデル入力のセクションで温度に T0 及び絶対圧に p0 を設定します。換算電子移動度 $\mu_e N_n$ に mueN を設定します。

表面反応

1. フィジックスツールバー>境界をクリックし、重化学種輸送>表面反応を選択します。
2. 表面反応の設定ウィンドウで境界選択を Walls にして、式に $Ar+ \Rightarrow Ar$ を入力します。
3. フィジックスツールバー>境界をクリックし、重化学種輸送>表面反応を選択します。
4. 表面反応の設定ウィンドウで境界選択を Walls にして、式に $Ars \Rightarrow Ar$ を入力します。

境界条件

1. 壁: フィジックスツールバー>境界をクリックし、ドリフト拡散>壁を選択して設定ウィンドウで境界選択を Walls にします。
2. 反射係数に 0.2 を入力します。
3. 接地: フィジックスツールバー>境界をクリックし、静電場>接地を選択して設定ウィンドウで境界選択を Walls にします。

材料

1. 材料ノードを右クリックし、ブランク材料を選択します。
2. 設定ウィンドウでドメインを Coils に選択し、以下パラメータを設定します。

▼ 材料コンテンツ

特性	名前	値	単位	特性グループ
✓ 導電率	sigma	6E7	S/m	基本
✓ 比誘電率	epsi...	1	1	基本
✓ 比透磁率	mur	1	1	基本

3. 材料ノードを右クリックし、ブランク材料を選択します。
4. 設定ウィンドウでドメインに 5 を設定し、以下パラメータを設定します。

▼ 材料コンテンツ

特性	名前	値	単位	特性グループ
✓ 導電率	sigma	0	S/m	基本
✓ 比誘電率	epsi...	1	1	基本
✓ 比透磁率	mur	1	1	基本

5. 材料ノードを右クリックし、ブランク材料を選択します。
6. 設定ウィンドウでドメインに 4 と 12 を設定し、以下パラメータを設定します。

▼ 材料コンテンツ

特性	名前	値	単位	特性グループ
✓ 電気導電率	sigma	0	S/m	基本
✓ 比誘電率	epsil...	4.2	1	基本
✓ 比透磁率	mur	1	1	基本

メッシュ

1. メッシュ 1 をクリックし、設定ウィンドウで要素サイズをより細かいにします。
2. メッシュ 1 ノードを右クリックし、その他の操作>エッジを選択して、設定ウィンドウで境界 6、8、44、45、および 54 を選択します。
3. エッジ 1 ノードを右クリックし、サイズを選択します。設定ウィンドウで要素サイズのセクションでカスタムにチェックを入れ、最大要素サイズに 0.001 を設定します。
4. メッシュ 1 ノードを右クリックし、フリーメッシュ 3 角形を選択し、設定ウィンドウでジオメトリックエンティティレベルをドメインにし、ドメイン 3 を選択します。
5. フリーメッシュ 3 角形 1 ノードを右クリックし、サイズを選択します。設定ウィンドウで要素サイズのセクションで既定タイプを「さらに細かい」にします。
6. メッシュ 1 ノードを右クリックし、境界層を選択し、設定ウィンドウでジオメトリックエンティティレベルをドメインにし、ドメイン 3 を選択します。
7. 境界層 1 >境界層特性ノードをクリックし、境界選択を Walls にし、境界レイヤ数に 5、境界層ストレッチングファクタに 1.4 を設定します。
8. メッシュ 1 ノードを右クリックし、マップトを選択します。
9. 設定ウィンドウでジオメトリックエンティティレベルをドメインにし、選択を Coils にします。
10. マップト 1 ノードを右クリックし、分布を選択します。設定ウィンドウで境界選択を Coil Boundaries にします。分布特性を既定タイプに変更し、分割数に 35、要素比に 8 を設定します。次は、分布法を等比数列にし、対称にチェックを入れます。
11. メッシュ 1 ノードを右クリックし、フリーメッシュ 3 角形を選択します。
12. 全て作成ボタンをクリックします。

スタディ 1

1. スタディ 1 ノードを展開し、ステップ：周波数-過渡をクリックします。設定ウィンドウで次ページの図の通りに設定します。
2. スタディ 1 ノードを右クリックし、計算を実行します。

周波数過渡

計算 解を更新

ラベル: 周波数過渡

▼ スタディ設定

時間単位: s

時間: $0 \cdot 10^{\{\text{range}(-8,5/20,-3)\}}$ s

相対トレランス: 0.001

周波数: 13.56E6

範囲

入力法: 値の数

スタート: -8

停止: -3

値の数: 21

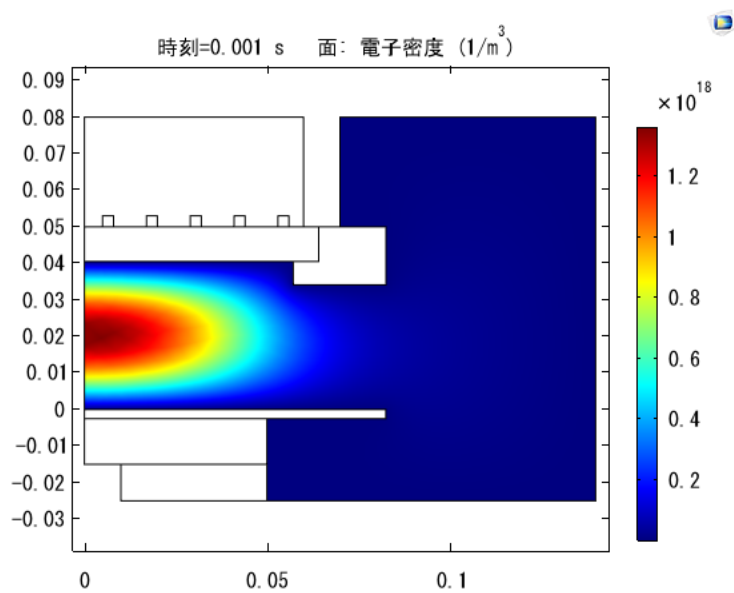
全ての値に適用する関数: exp10

置換 追加 キャンセル

結果

電場

1. 結果 : 電子密度 (icp)をクリックします。



以上