

Plasma Module

- Low volume, high price product.
低容量、高価格の製品
- Requires a high degree of expertise to operate.
操作するための高度な専門知識が必要
- Even the simplest plasma models are rather complex.
最も単純なプラズマモデルでもかなり複雑な物理現象を含む
- The first version was released with V4.0a in July 2010.
最初のバージョンが2010年7月の4.0aにリリースされた

News in V5.3a

- New interface: Plasma, Time Periodic プラズマ、時間周期的
 - Special interface for modeling capacitively coupled plasmas.
容量結合プラズマをモデル化するための専用インターフェース
 - Revolutionary method not available in any academic or commercial code.
学術あるいは汎用コードに存在しない革新的解法
- New models.
新しいモデル

Types of Plasma

プラズマ種類

- The following are the most common types of plasmas:

最も一般的なプラズマ種類

- Inductively coupled plasmas (ICP). **Easy** 誘導結合型プラズマ
- Direct Current (DC) discharges. **Easy** DC放電
- Capacitively coupled plasmas (CCP). **Medium** 容量結合型プラズマ
- Microwave plasmas. **Medium** マイクロ波プラズマ
- Magnetized DC discharges. **Medium** 磁化されたDC放電
- Combined ICP/CCP reactor. **Hard** 誘導結合型放電と容量結合型放電の結合
- Electrical breakdown. **Hard** 電気絶縁破壊

Increasing
difficulty to
model

↓ モデル化する難しさを増加

- In each of the above, the mechanism of energy transfer from the electromagnetic fields to the electrons is different.

各プラズマ放電における電磁場から電子までの異なるエネルギー転送のメカニズムである。

Problem Statement

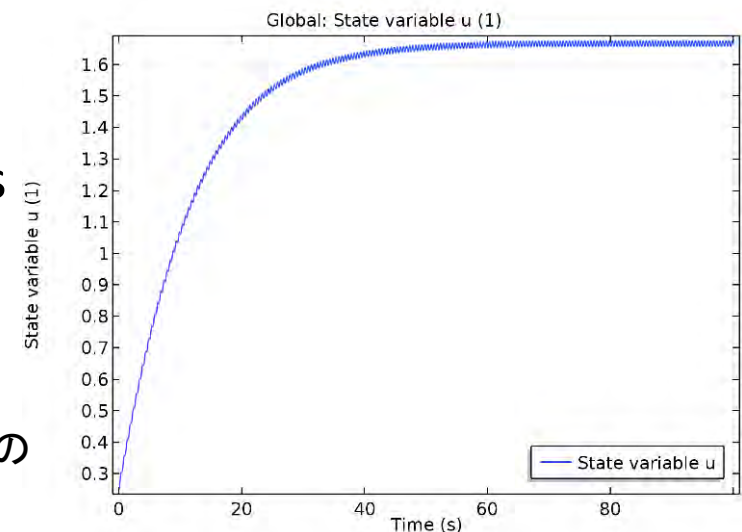
問題の提示

- One of the main challenges of CCP modeling is the overwhelming number of RF cycles required before the plasma evolves to a time-periodic steady-state solution. CCPモデリングの主な課題の1つは、プラズマが周期的定常状態に達するまでに多数のRFサイクルが必要。
- At pressures on the order of 1 torr, it can take 50–100,000 cycles before the plasma reaches its periodic steady-state solution. 1トル程度の圧力に対して、プラズマが周期的定常状態に達するまでに50~100,000サイクルかかる。
- The following test problem roughly describes the evolution of a metastable species in a CCP: 以下のテスト問題は、CCPにおける準安定の化学種の発展を大まかに表現する。

$$\left(\frac{1}{f}\right) \frac{du}{dt} = a \sin^2(\omega t) - bu - cu^2$$

- The right-hand side of the equation represents the periodic production and losses of the metastable in the plasma, with applied frequency ω .

方程式の右辺は、周波数 ω であるプラズマ中の準安定の化学種の周期的な生成および損失を表す。



Solution

解法

- Reformulate the test problem as a boundary value problem:

テスト問題を境界値問題として再構成する。

$$\left(\frac{1}{f}\right) \frac{du}{dx} = a \sin^2(\omega x) - bu - cu^2$$

and immediately compute the periodic steady state solution by

imposing periodic boundary conditions: 周期的な境界条件に基づく周期的定常解を直接的に求める。

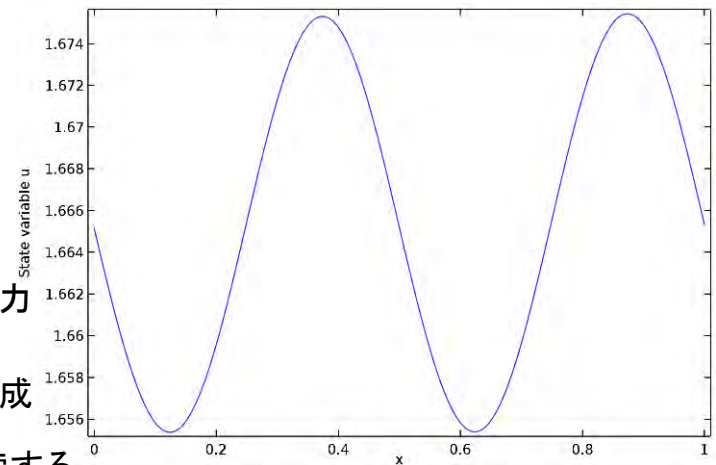
$$u(x = 0) = u(x = \frac{2\pi}{\omega})$$

このアプローチは多くのメリットがある。

- There are many advantages to this approach:

- Direct power input from electrodes. 電極にパワーを直接入力
- Natural formulation for the self DC bias. 自己DCバイアスの自然形成
- Easy to explore parametric spaces. パラメトリックな空間で簡単に探索する
- All the high order harmonics are still resolved.
- Multiple frequencies can be used. 全ての高次高調波も求められる
- Highly scalable on multicore machines and clusters. 複数の周波数に対応

マルチコアマシンとクラスタでの高度な拡張性



Periodic steady state is computed immediately!

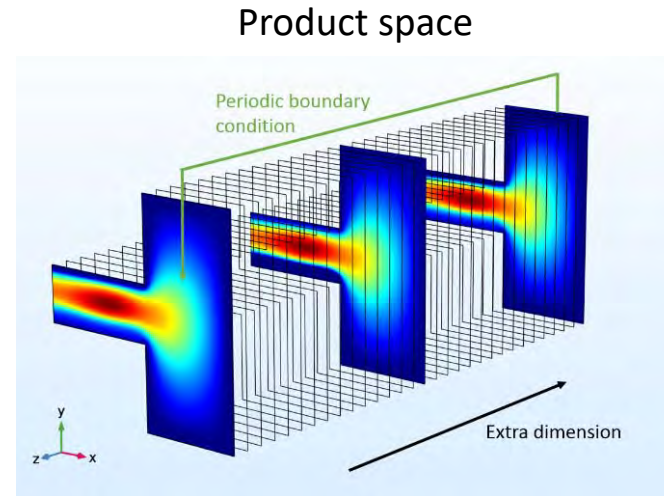
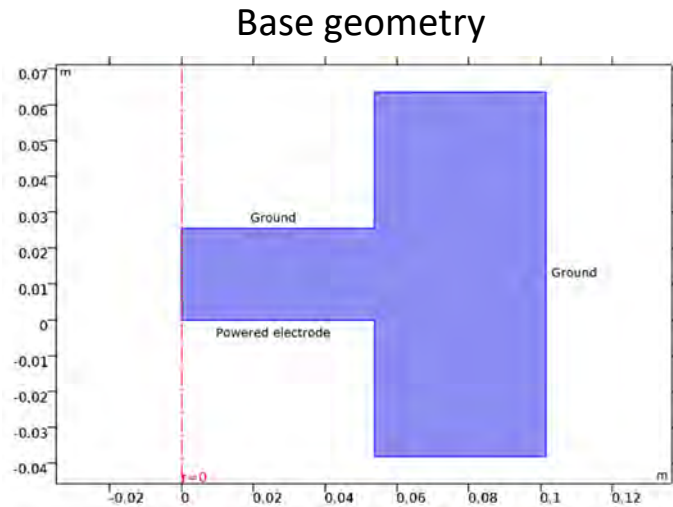
周期的定常解を直接的に求める

Integration with the Plasma Module

プラズマモジュールとの統合

- COMSOL allows extra dimensions to be attached to a given geometry. We can use this and solve the plasma equations in the product space formed between the base geometry and extra dimension.

COMSOLの余剰次元は、指定されたジオメトリに利用可能。基本ジオメトリと余剰次元の間に形成される製品空間内のプラズマ方程式を解く。



- A dramatic speedup in computation time is obtained with this new method:

この新しい方法は、計算の大幅な高速化が得られる

Dimension	Approx. Time (Version 5.3)	Approx. Time (Version 5.3a)
1D	10 hours	20 seconds
2D	2 weeks	1 hour

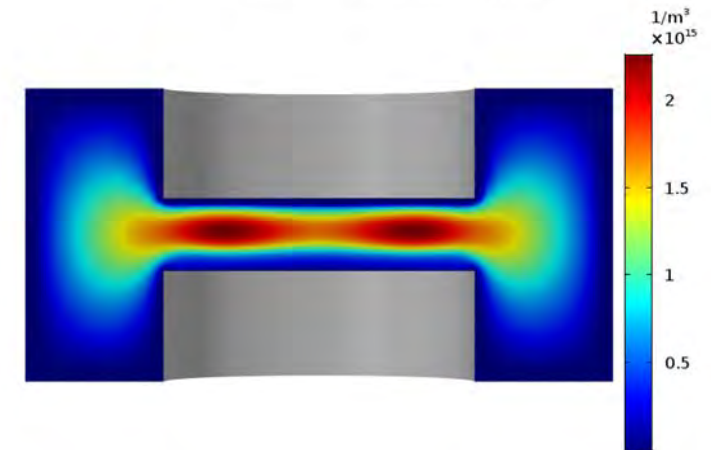
New Model: GEC Reference Cell

GEC参照セル

- This model investigates the GEC (Gaseous Electronics Conference) reference cell in two dimensions. このモデルは、GEC参照セルを2次元で検討する。
- The cell is driven with a fixed power, and results show good agreement with those published in the literature.

セルに固定パワーを印加され、結果は文献に発表された結果とよく一致する。

Period fraction: 0.0 Surface: Electron Density (1/m³)

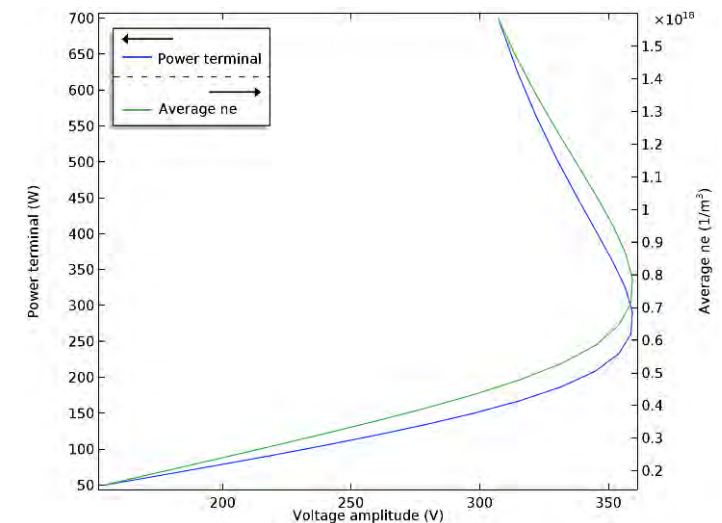


New Model: Alpha to Gamma Transition

アルファからガンマへの移行

- Capacitively coupled RF discharges can operate in two distinct regimes depending on the discharge power. 容量結合RF放電は、放電パワーに対して2つの異なる放電モードがある。
- This model investigates the alpha and gamma regimes and the transition between them in a capacitively coupled RF discharge at atmospheric pressure. このモデルは、大気圧での容量結合RF放電におけるアルファ及びガンマ放電及びそれらの間の移行を検討する。
- Results agree well with the literature.

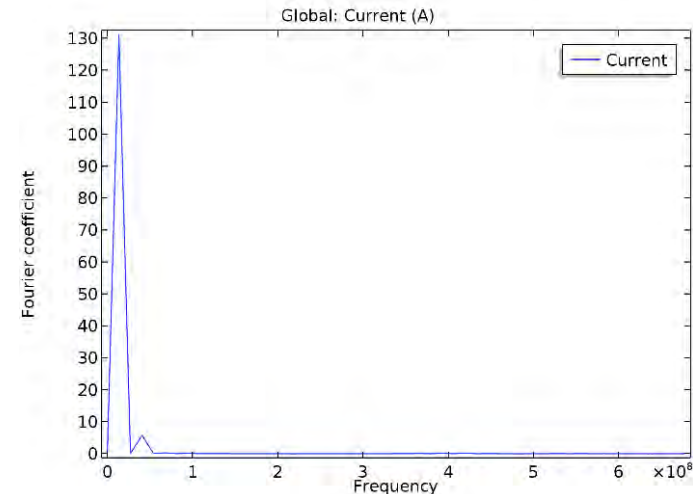
結果は文献(に発表された結果)とよく一致する。



New Model: Computing Plasma Impedance

プラズマインピーダンスを計算

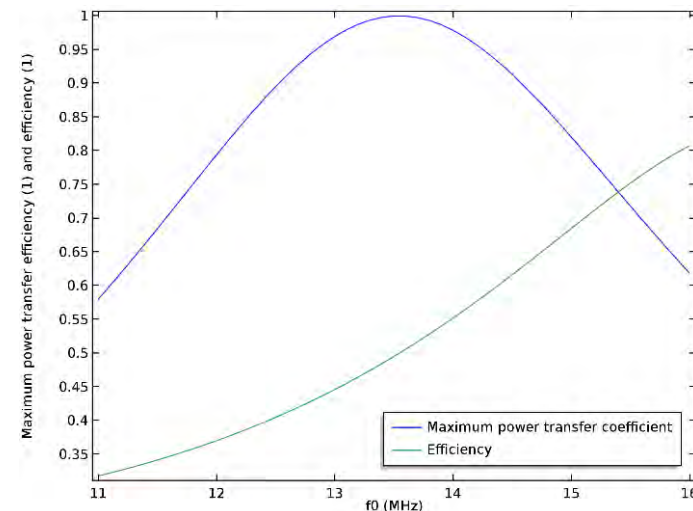
- This tutorial model demonstrates how to compute the plasma impedance.
このチュートリアルモデルは、プラズマインピーダンスを計算する方法を示す。
- The impedance value is very useful when designing matching networks.
インピーダンス値は、マッチングネットワークを設計する際に非常に役立つ。



New Model: Impedance Matching

インピーダンス・マッチング

- This tutorial drives a capacitively coupled plasma with an L-type matching network at high and low powers.
このチュートリアルは、L型マッチングネットワークを用いて高パワーと低パワーに対して容量結合プラズマを検討する。
- Sweeps over power, frequency and pressure are performed, and their effect on the match power transfer ratio and efficiency are examined.
パワー、周波数および圧力の掃引が実行され、それらのパワー伝達比および効率に与える影響が検討される。

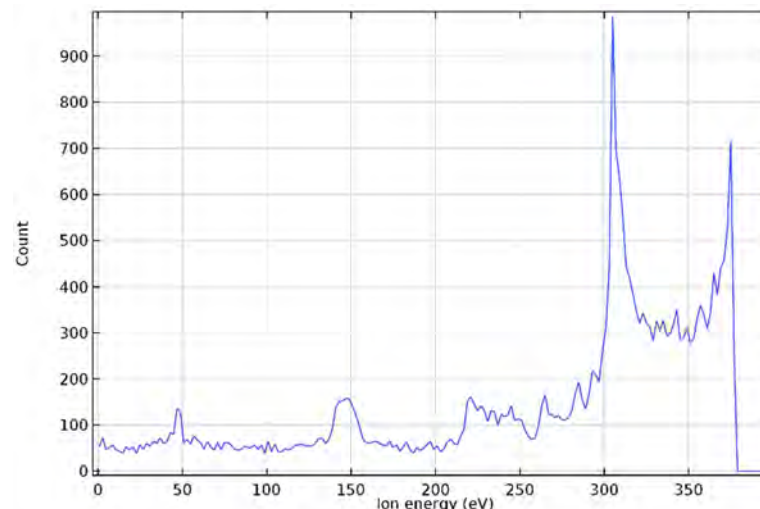


New Model: Computing the IEDF

IEDFを計算

- Flagship model showcasing the new interface! 新しいインターフェースのフラッグシップモデル
- This model computes the ion energy distribution function (IEDF) for a commercial capacitively coupled plasma reactor.
このモデルは、商用容量結合プラズマリアクタのイオンエネルギー分布関数(IEDF)を計算する。
- The results show good agreement with experimental data.

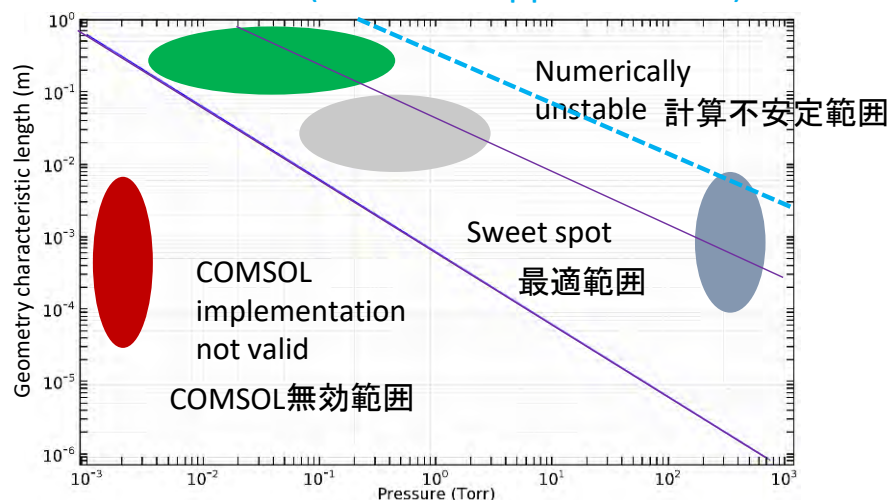
結果は実験データとよく一致する。



Conclusions: Non-equilibrium Discharges

V5.3 (local field approximation)

非平衡(プラズマ)放電



Questions?

- Semiconductor processing 半導体加工
- Dielectric Barrier Discharges 誘電体バリア放電
- Vacuum arcs 真空アーク放電
- DC Discharges 直流放電