3. 光源をはかる

3.4 光源プラズマのシミュレーション ーキセノンエキシマランプを例としてー

小田 昭 紀

(名古屋工業大学)

Light Source Measurement

Discharge Plasmas for Light Sources – Xe Excimer Lamp –

ODA Akinori

Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555, Japan

(Received 8 October 2005)

Excimer lamp using dielectric-barrier discharges is one of the most powerful light sources of vacuum ultraviolet and applied to the fields of photo-chemical processes such as photo-deposition of thin films, surface modification and polymer etching. The lamp characteristics have been simulated by a one-dimensional fluid model, and their dependence on the electrical input power has been examined under various conditions of the driving frequency, the gas pressure, the waveform of the applied voltage and the discharge gap length. It was found that in particular at narrower discharge-gap, the light output efficiency is improved by means of the applied voltage waveform with an extremely short risetime.

Keywords:

excimer lamp, dielectric-barrier discharges, xenon, vacuum ultraviolet light, fluid model

3.4.1 はじめに

前節まで、光源を「はかる」手法として「計測」を中心に説明を行ってきました。「はかる」手法は、これだけではなく、適切な数値モデル化に基づく「シミュレーション」によっても光源プラズマを「はかる」ことができます。本節では、数ある光源プラズマの中から光プロセス分野など幅広い分野において産業的に応用されているキセノンエキシマランプ（波長 $\lambda = 172$ nm）を例にとり、最初にその励起源である誘電体バリア放電のモデリング手法に関して説明をし、その後、得られた結果の一例を紹介し、シミュレーションで何を「はかる」ことができるのかについて順を追って説明していきます。

3.4.2 誘電体バリア放電

誘電体バリア放電とは、金属電極間に少なくとも1枚の誘電体が挿入された電極構成下で高電圧を印加した際に発生する放電をいいます。放電進展に伴う誘電体表面への蓄積する電荷がもたらす電流抑制作用によりアーク放電にならずに高ガス圧力下でも安定にグロー放電が維持され、その結果様々な工学応用で重要となる励起原子・分子や解離種（ラジカル）が効率よく生成できる利点を持っています。その放電形態は、一般的にはストリーマ放電であり、輝度

author's e-mail: aknr.oda@nitech.ac.jp

の高いフィラメント状放電が発生ならびに消滅を繰り返しながら電極全面にランダムに分布することが知られています[1]。本放電を利用したキセノンエキシマランプは、高ガス圧（数百 Torr）のキセノンガスで本放電を発生させた際に生成されるキセノンエキシマからの真空紫外域の自然放出光（波長 $\lambda = 172$ nm）を出力するランプです[2]。

Fig. 1 Schematic diagram of simulation model of Xe barrier discharge excimer lamps.

3.4.3 キセノンバリア放電のモデリング

Fig. 1に、本節で紹介するバリア放電シミュレーションのモデル図を示します。この図から、両金属電極に厚みをもった誘電体を貼り付けた構成になっており、キセノンエキシマランプ構造を空間1次元方向（本図中 z 方向）に簡略化したものに対応しています。両電極間には低周波交流電圧（振幅：数kV、駆動周波数：数～数十kHz）が印加されます。そして、両金属電極間で、①数密度連続の式、②電子エネルギー保存式、③ボアソンの式などを連立させて数値計算させることによって、キセノンバリア放電の詳細な特徴を得ることができます。具体的には、①からは放電内の荷電粒子と励起原子・分子密度、②からは放電内の電子の有する平均的なエネルギー、③からは電極間に発生する電界の時間的空間的な変化がそれぞれ求められます。加えて、金属電極間を流れる電流の波形や各部の電圧波形、放電への投入電力、放電空間内で生成されたキセノンエキシマからの光出力や効率などが計算できます。

Fig. 2に、キセノンバリア放電中のエネルギーダイアグラムを示します。本図に示すように様々な衝突過程が存在します。特にキセノンエキシマに着目すると、はじめに高エネルギーを有した電子が基底状態のキセノン原子へ衝突することにより準安定励起準位や共鳴励起準位といったキセノン励起原子が生成されます。その後、この励起原子と基底状態のキセノン原子との3体衝突を経てXeエキシマ(Xe_2^*)が生成されます。その後、自然放出によりXeエキシマが脱励起し、その際に真空紫外光を放射します。したがって、効率よい真空紫外光放射のためには、キセノンエキシマの生成過程が頻繁に起こる高いガス圧力下でキセノン励起原子生成に必要な高エネルギー電子を如何に効率よく生成するかが鍵になります。その方法を模索する上で、今回紹介するようなシミュレーションが威力を発揮するわけです。

3.4.4 キセノンバリア放電特性

Fig. 3に、典型的なキセノンエキシマランプ動作条件時

Fig. 2 Reaction processes in Xe barrier discharges.

Fig. 3 Voltage-current characteristics in low frequency Xe barrier discharges at high pressure.

の低周波キセノンバリア放電の電流電圧波形を示します[3]。その際のシミュレーション条件は、キセノンガス圧力 400 Torr, 金属電極間隔 0.8 cm, 誘電体の厚さ 0.2 cm, 比誘電率 4, 印加電圧波形は正弦波（駆動周波数 50 kHz, 振幅 8 kV）です。この図から、放電空間内に挿入された誘電体の影響により電流 (i_T) が印加電圧 (v_s) より $\pi/2$ 進んだ容量性の放電であることがわかります。また、電流波形においてストリーマ放電の発生によって急激に電流が上昇しています。その後、誘電体による電流抑制作用により誘電体表面の電荷蓄積による電圧降下 (v_W) が起こり電流は減少します。その結果、電流波形に急峻なピークが印加電圧の半サイクルあたりに一度現れています。

3.4.5 キセノンバリア放電特性の各種依存性

Fig. 4に、正弦波電圧印加時のキセノンバリア放電におけるエキシマ光効率の駆動周波数およびガス圧依存性を示します。駆動周波数ならびに気圧を高くすることにより高電力が放電空間に入力され、その結果エキシマ光効率が増加していることがわかります。このことから、均一な放電を高電力密度の放電条件で生成できれば、ランプの高出力化・高効率化が可能であることを示唆しています。

しかしながら、印加電圧波形を正弦波とする場合、スト

Fig. 4 Input-power dependence of Xe excimer lamp efficiency for various frequency and gas pressure ranges.

Fig. 5 Applied voltage waveforms in Xe excimer lamps.

Fig. 6 Input power dependence of light output power and efficiency of Xe excimer lamps for various applied voltage waveforms.

リーマ放電の発生後もエキシマ生成には寄与しない電流が流れることから一般にエキシマ光効率がよくありません。そこで効率改善の方法の1つとして印加電圧波形に着目しシミュレーションを行った結果を以下に紹介します[4]。Fig. 5に設定した印加電圧波形(Case AからCase Eまでの5種類)を、Fig. 6に上記波形印加時のエキシマ光出力ならびに効率の入力電力依存性をそれぞれ示します。Fig. 6から、Fig. 5におけるCase CやCase Eといった立ち上がりの

急峻な印加電圧印加時においてエキシマ光効率の上昇が確認できます。特に、放電ギャップがより短い場合(本図中 $d_G = 1\text{ mm}$)、Case Eの電圧印加時においておよそ2倍の効率上昇が確認され、立ち上がりの急峻なパルス電圧を印加電圧とした場合にエキシマ光効率改善の可能性がシミュレーションの見地から示唆されます。独特の電極形状ではありますが、実際にパルス電圧を印加電圧とした場合のキセノンエキシマランプの実験でも本シミュレーションの妥当性を支持する結果が得られています[5]。

3.4.6 まとめ

本節では、光源プラズマのシミュレーションの例として、キセノンエキシマランプを取り上げて順に説明を行いました。これまでの結果から、適切な数値モデル化に基づくシミュレーションは、光源プラズマを「はかる」手法として有効であることが示されました。この手法は、今後その重要度を増していくことが十分に予想されます。

参考文献

- [1] B. Eliasson and U. Kogelschatz, *Appl. Phys. B* **46**, 299-303 (1988).
- [2] K. Stockwald and M. Neiger, *Contrib. Plasma Phys.* **35**, 15-22 (1995).
- [3] A. Oda, Y. Sakai, H. Akashi and H. Sugawara, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **32**, 2726-2736 (1999).
- [4] A. Oda, H. Sugawara, Y. Sakai and H. Akashi, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **33**, 1507-1513 (2000).
- [5] F. Vollkommer and L. Hitzschke, *Proc. 8th Int. Symp. on Sci. and Technol. of Light Sources II*, **07**, 51-60 (1998).

おだ あきのり
小田 昭紀

2001年北海道大学大学院工学研究科電子情報工学専攻博士後期課程修了。博士(工学)。同年より名古屋工業大学生産システム工学科助手、2003年名古屋工業大学大学院工学研究科助手(しくみ領域)、現在に至る。主な研究テーマは、計算機シミュレーションによる光源プラズマを中心とした高気圧放電プラズマの解析。典型的なA型・山羊座な性格。趣味は、ぶらっと映画館に出かけての映画鑑賞。