

# Hidrojen Plazma İçerisinde Dalga Bozulması; Elektrot Potansiyeli ve Basıncın Etkisi

Selçuk HELHEL  
Akdeniz Üniversitesi  
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
Konyaaltı, Antalya  
[selcukhelhel@akdeniz.edu.tr](mailto:selcukhelhel@akdeniz.edu.tr)

**Özet:** 27.12MHz ve 1.94MHz'lık RF kaynaklarla üretilen ve  $H_3^+$  iyonlarının baskın olduğu yapılar incelenmiştir. Ortamın dielektrik özelliği, bir girişimetre aracılığıyla belirlenmiştir. Faz – Genlik ilişkileri ele alınarak dalga bozulmasına ilişkin karmaşık(kompleks) değişkenin çözümü yapılmıştır. Plazma içerisinde ilerleyen dalgaya ait bozulmanın, ortam basıncı ile elektrot duvar potansiyeli değerleri ile doğrudan bağlantılı olduğu, deneysel çalışmalarla gösterilmiştir. Elektrot potansiyel değerinin artırılması ile ortama ilişkin dielektrik katsayının sanal kısmı büyürken, gerçel kısmı azalmaktadır. Ancak elektrot potansiyel değeri belli bir seviyede korunmak üzere ortam basıncı yükseltildiğinde, göreceli dielektrik katsayının hem gerçel kısmının hem de sanal kısmının küçüldüğü görülmektedir. Plazma ortam empedansının elektrot potansiyeli ve basınç gibi ikibağımsız parametre ile kontrol edilebileceği gösterilmiştir.

## 1. Giriş

Motta [1] plazma ile doldurulmuş dielektrik bir dalga klavuzu içerisindeki dalga paternini inceleyerek nitrojen plazma için  $\epsilon=0.0087-j0.00158$  değerini belirledi. Plazma ortamına ilişkin dielektrik sabiti ifadesini denklem 1 ile verildiği biçimde tanımladılar

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_0} = \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \nu^2}\right) + j \frac{\nu}{\omega} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + \nu^2} \quad (1)$$

Burada  $\omega_{pe}$  elektron plazma frekansı olmak üzere  $n_e$ ,  $m_e$ ,  $\omega$  ve  $\nu$  sırası ile elektron yoğunluğu, elektron kütlesi, çalışma frekansı ve elektron - nötral çarpışma frekansını ima etmektedir. Petrin [2] kritik seviyenin üzerindeki elektron yoğunlaşmalarının olduğu plazma katmanları boyunca ilerleyen mikrodalgaların iletiminin ne olasılıkta görülebileceği üzerine çalışırken, Akhtar [3] düşük ve yüksek çarpışmalı plazmalar için plazma yoğunluğu ile etkin çarpışma frekanslarını belirlemek üzere bir mikrodalga girişimetre tasarladı. Çalışmasında ortaya koyduğu en önemli bilgi, özellikle orta seviyede çarpışmaların olduğu geçiş bölgelerinde yani çarpışma frekansının dalga frekansından küçük olduğu yerlerde kayıp katsayılarının hesaba katılmaması halinde dikkate değer hataların ortaya çıkabileceği idi. Goodhead [4] ise küçük faz kaymalarını algılayabilecek nitelikte ve kırılma indeksini belirleyebilecek nitelikte kablo temelli bir girişimetre tasarladı.

Overzet [5], GEC reaktörü için elektron yoğunluğunu ölçmek üzere bir girişimetre tasarlayarak ortamdaki serbest elektronların varlığının dielektrik geçirgenliği azaltırken ortamın elektriksel iletkenliğini artırdığını gösterdi. Laroussi [6], yüksek basınç değerlerine ulaşıldığında, faz kaymaları ve genlik kayıplarının nedeninin yalnızca ortama ilişkin elektron yoğunluğu olmadığını ve bunun yüksek çarpışmalar sonucunda ortaya çıktığını gösterdi. Bu çalışma ile 15.3GHz bandında çalışan zebra tipi bir girişimetre kullanarak, kapasitif kavramalı RF plazma düzeneği içerisinde üretilen plazmanın karmaşık geçirgenliği elektrot potansiyel değeri ve basınca bağlı olarak incelendi.

## 2. Deneysel Düzenek ve Bozulma İlişkisi

Ölçmeler 27.12MHz ve 1.94MHz frekanslarında çalışan iki RF kaynağın farklı güç kombinasyonları altında sürülen kapasitif kavramalı RF plazma düzeneği üzerinde, detayları şekil 1 ile verilen girişimetre kullanarak gerçekleştirildi. 20mW çıkış gücüne sahip, gerilim kontrollü bir YIG osilatörü tarafından üretilen güç uygun bir horn anten aracılığı ile reaktöre kavrıldı. Bu arada osilatör 15.3GHz ile 15.33GHz arasında çalışırken üçgen çıkışlı rampa işareti üretmektedir. Refreans ve plazma ayakları arasında toplam 7m lik bir mesafe farkı

bulunmaktadır. Bu mesafe adı geçen tarama aralığında toplam en çok  $2\pi$  radyanlık faz kaymasını temin edebilecek bir uzunluğu ifade etmektedir. Plazmanın olmadığı durumda, faz ve genlik kaybı değerleri referans işaretlerle birlikte not edilerek sıfır faz ve sıfır kayıp noktaları olarak ele alındı. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan birisi horn antenin plazmaya göre uzak alan sayılacak bir mesafede konuşlandırılma zorunluluğudur.

### 2.1 Bozulma İlişkisi

Maxwell denklemleri, iletkenlik ve magnetik geçirgenlik ifadelerini de için alacak şekilde, denklem (3) ve denklem (4)' de verildiği biçimde yazılabilir.

$$\nabla \times \vec{E} = j\omega\mu\vec{H} \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon\vec{E} = j\omega\left(\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}\right)\vec{E} \quad (4)$$

Bu şekilde bir plazma boyunca ilerleyen bir dalga doğal olarak genlik kaybı ve faz kayması sonucu doğurmaktadır ve  $\gamma$  propagasyon katsayısı olmak üzere algılanan elektrik alan değeri denklem (5) de verildiği biçimde yazılabilir. Magnetik geçirgenlik üzerinde oluşan faz açısı değeri elektrik ve manyetik alanlar arasında, referans ve plazma kollarında, bir kayma olduğunu ifade eder. Karmaşık manyetik geçirgenliğin (permittivity) gerçel kısmı gelen işaret üzerinde oluşan faz kaymasını ifade ederken, sanal kısmı işaret üzerinde oluşan genlik kaybını ifade etmektedir ve karmaşık propagasyon sabiti,  $\alpha$  ve  $\beta$  zayıflama ve faz sabitlerini ifade etmek üzere, denklem (6) da verildiği biçimdedir.

$$E^r = E_0 e^{j(\gamma + \alpha x)} \quad (5)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (6)$$

Plazmanın karmaşık bir yapıda olması halinde, kayıp ve faz denklemleri aşağıda verildiği üzere denklem (7) ve denklem (8) ile ifade edilir.

$$\alpha \equiv \frac{v}{\omega} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + v^2} \quad (7)$$

$$\beta \equiv \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + v^2}\right) \quad (8)$$

Deney boyunca, iki temel ölçme işlemi gerçekleştirildi. İlk ölçme algılanan işaretin genliğini belirlemek ve ikincisi sihirli T nin çıkışı vasıtası ile faz kaymasının belirlenmesidir. Ölçülen kayıp değeri, algılanan işaret genliğinin referans işaret genliğine bölünmesi ile hesaplandı. Bu değer denklem (9) ile ifade edilmektedir.

$$\frac{E^i - E^r}{E^i} \equiv \frac{v}{\omega} \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2 + v^2} \quad (9)$$

Bu arada  $E^r$ ,  $E^i$ ,  $v$ ,  $\omega_{pe}^2$  ve  $\omega$  sırasıyla, algılanan işaretin genliği, gönderilen işaretin genliği, elektron çarpışma frekansı, elektron plazma frekansı ve çalışma frekansını ifade eder. Elektron plazma frekansının yaklaşık ifadesi denklem (10) ile verilmektedir [7]

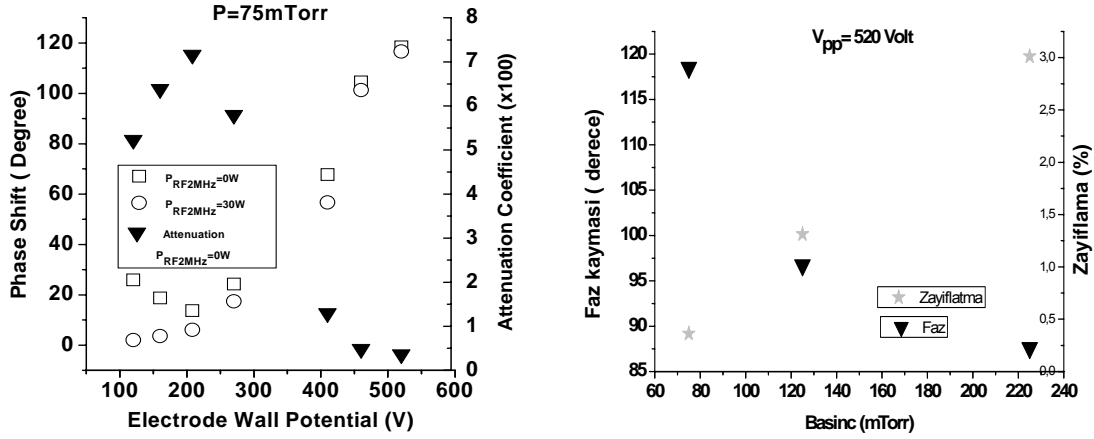
$$f_{pe} \approx 8980\sqrt{n_0} \quad (10)$$

$n_0$  nötr halde plazma merkez frekansını ifade etmekte olup yazar tarafından daha evvelce farklı uygulamalar için ölçülmüştü [8,9,10]. Denklem (4) ve denklem (5) birlikte kullanılarak, istenen çarpışma frekansını dolayısı ile genlik kaybı ve faz bozulmasını değerlerini hesaplayabilir.

### 3. Sonuçlar ve Değerlendirme

Şekil 1, içi boş sembollerle faz kaymasını gösterirken aynı şekil üzerinde içerisi siyah ile doldurulmuş semboller güç kaybını göstermektedir. Bu şekil üzerinde görülen elektrot potansiyel değerleri, 75mTorr basınç altında Lyon Elektron Dağılım Fonksiyonu (IEDF) verilerinin çözümlenmesiyle elde edilmiştir [11]. Elektrot duvar potansiyel değerinin artırılması ile birlikte faz kayması değeri  $120^\circ$  ye ulaşacak şekilde artmaktadır. Ancak elektrot potansiyel değerini sabit tutmak üzere, uygulanan ikincil RF kaynağı ( $P_{1.94MHz}=30W$ ) faz kayması değerini düşürmekte ancak bu değer yüksek elektrot potansiyeli değerlerinde neredeyse %1 seviyelerine kadar yaklaşmakta ancak her iki durumda da birbirlerini çok iyi derecede izlemektedir [8]. Bu arada elektrot duvar potansiyel değerinin artması ile birlikte kayıp yüzdesi kabaca 8 den 0.5 değerine kadar ciddi oranda azalmaktadır

( bakınız siyah içi dolu üçgen semboller). Görüleceği üzere, elektrot duvar potansiyel değerinin artırılması ile birlikte sanal kısım büyürken, gerçel kısım küçülmektedir. Bunun sonucu olarak merkez plazmaya ilişkin admittans değerinin sanal kısmı büyümekte aynı şekilde gerçel kısmı küçülmektedir. Bu arada elektrot duvar potansiyeli değerini sabit tutmak üzere basıncın artırılması halinde gerçel kısım büyümekte buna karşın sanal kısım küçülmektedir (bakınız şekil 5). Bu sonuçlar artan çarpışma frekansının bir sonucu olarak açıklanmakla birlikte, basınç ve elektrot potansiyelerini değiştirerek farklı karmaşık empedans değerlerine sahip plazma ortamları elde edebiliriz. Bu durumda, tasarlanan ve empedans karakteri değiştirilebilen bu yapı, özel şartlar altında uzunluğunun çeyrek dalga boyu olacak şekilde seçilmesi halinde, çeyrek dalga boylu empedans trafosu olarak kullanılabilir.



Şekil11. 75mTorr basınç altında elektrot potansiyeline bağlı faz kayması değişimi ve sabit potansiyel altında basınca bağlı değişim

**Teşekkür :** Dublin City University (DCU) – İrlanda, Ulusal Plazma Araştırma Merkezi'nden Sayın Dr. Bert Ellingboe ve çalışmalarımı finanse eden EURATROM ve DCU –NPRL' e ayrıca teşekkür ederim.

#### Referanslar

- [1] C.C. Motta, A.D. Fonseca, G.H. Gomes, and H.S. Maciel, Complex Permittivity Measurement in Dielectric Waveguide Filled with Argon Plasma, SBMO/IEEE MTT-S IMOC 2001, Page: 273-277, Proceedings.
- [2] Andrei B. Petrin, Transmission of Microwaves Through Magneto active Plasma, IEEE Transactions On Plasma Science, Page 471-478, Vol. 29, No. 3, June 2001.
- [3] Kamran Akhtar, a) John E. Scharer, Shane M. Tysk, and Enny Kho, Plasma interferometry at high pressures, Review Of Scientific Instruments Volume 74, Number 2, February 2003, Page 996-1001.
- [4] D.T. Goodhead, G.H.J. Wantenaar, and M.E.Bacon, Refractive Indices of gases at microwave frequencies, American Journal of Physics, Vol. 44, No.3, March 1976, page 253-258.
- [5] Lawrence J. Overzet, Microwave Diagnostic Results from the Gaseous Electronics Conference RF Reference Cell, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 100, Number 4, July–August 1995.
- [6] Mounir Laroussi, Relationship Between The Number Density And The Phase Shift In Microwave Interferometry For Atmospheric Pressure Plasmas, International Journal Of Infrared And Millimeter Waves, Vol. 20, No. 8, 1999, Page 1501-1509.
- [7] Michael Lieberman and Allan J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, John Wiley & Sons, New York, 1994.
- [8] S. Helhel, L. Oksuz, A.R. Ellingboe, C. Gaman, Density Measurement of Confined CCP by Microwave Interferometer and Density at Electrode Wall Resolved From Energy Distribution Function, Plasma Source Science and Technologies ( Re-Submitted at April 2006).
- [9] S. Helhel, Analysis Of Dual Frequency Confined Capacitively Coupled Plasma At Low Power, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, (Accepted for the Issue of April 2006)
- [10] Selcuk HELHEL, Lütfi ÖKSÜZ, Multiple Frequency Analysis of Capacitively Coupled RF Plasma, ELECO 2005, 4th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 7-11 December 2005, Bursa, TURKEY.