

# **HỆ MAGNETRON PHẪNG CÂN BẰNG Ở ÁP SUẤT THẤP VÀ ỨNG DỤNG NÓ ĐỂ KIM LOẠI HÓA COMPACT-DISKS (CD<sub>s</sub>)**

**Đào Vĩnh Ái - Nguyễn Hữu Chí - Lê Trấn.**

Trường Đại học Khoa học Tự nhiên

(Bài nhận ngày 24/06/1999)

**TÓM TẮT :** Bằng tính toán lý thuyết công trình này đã chứng minh được rằng, phóng điện trong magnetron phẳng cân bằng có thể tồn tại ở chân không cao. Điện tích không gian trong miền áp suất này được xem như trạng thái âm. Cường độ dòng phóng điện  $I_d/p \sim V^2/B^2$  và có thể tồn tại ở áp suất đủ thấp. Kết quả tính toán khá phù hợp với thực nghiệm. Hệ magnetron phẳng này hoàn toàn thích hợp cho quá trình kim loại hóa trên đế cần nhiệt độ thấp, như đế polime hay các loại đế có nhạy cảm với nhiệt độ.

## **I. MỞ ĐẦU.**

Mặc dù phóng điện Penning ở chân không cao đã ra đời từ lâu, nhưng những nguyên tắc cơ bản của nó vẫn được áp dụng cho các loại phóng điện khác nhau như phóng điện magnetron trụ, magnetron ngược trong thiết bị đo chân không; bơm ion-getter; nguồn ion; đặc biệt ngày nay phóng điện trong magnetron phẳng (MP) đã được ứng dụng rộng rãi trong công nghệ phủ màng.

Có thể chia phóng điện MP ra làm 2 loại :

- Phóng điện MP không cân bằng (unbalancing the magnet) ở đó plasma thỏa điều kiện giả trung hòa, nồng độ điện tử  $n_e$  gần bằng nồng độ ion  $n_i$  và sự mất mát của chúng được xác định bởi quá trình khuếch tán lưỡng cực. Áp suất phóng điện loại này với  $p > 10^{-3}$  torr.

- Phóng điện MP cân bằng – ở đó đường sức cảm ứng từ hoàn toàn có hướng song song (hay gần song song) với bề mặt catốt. Nếu chúng làm việc ở áp suất thấp

$p < 10^{-3}$  torr, thì  $n_i \ll n_e$  và plasma chỉ tồn tại một loại hạt  $n_e$  – plasma điện tử<sup>[1]</sup>. Dưới tác dụng của từ trường mạnh, điện tử bị hãm hoàn toàn ở không gian gần bề mặt catốt, còn ion hầu hết đập lên bia thực hiện chức năng phún xạ. Do đó bề mặt đế sẽ không tương tác với plasma, không bị đốt nóng – hai yêu cầu quan trọng cho quá trình phủ màng trên đế polime hay các loại đế nhạy cảm với nhiệt độ. Tuy nhiên đến nay vẫn chưa thấy công trình nào nghiên cứu chi tiết nó ngoài công trình thực nghiệm [1].

Để hiểu bản chất của loại phóng điện này cần nghiên cứu cụ thể cả lý thuyết lẫn thực nghiệm. Bởi vậy công trình này bằng tính toán lý thuyết sẽ xác định cơ chế vật lý và các thông số phóng điện tối ưu của loại phóng điện trên, nhằm thiết kế hệ phún xạ MP phù hợp cho quá trình phủ màng mỏng trên đế polime nói chung và cho đế PMMA hay policarbonat của CD<sub>s</sub> nói riêng.

### **II.1.1. LÝ THUYẾT VỀ DÒNG PHÓNG ĐIỆN CỦA HỆ MP CÂN BẰNG Ở ÁP SUẤT THẤP.**

Xuất phát từ thực nghiệm<sup>[1]</sup> có thể đưa ra 2 giả thuyết sau đây :

• Điện tích của không gian phóng điện MP cân bằng ở áp suất thấp là điện tử. Muốn vậy cường độ từ trường phải đủ lớn đến mức để hệ số khuếch tán  $D_{e\perp}$  của điện tử phải nhỏ hơn hệ số khuếch tán  $D_{i\perp}$  của ion ( $\perp$  là ký hiệu hướng trực giao với từ trường).

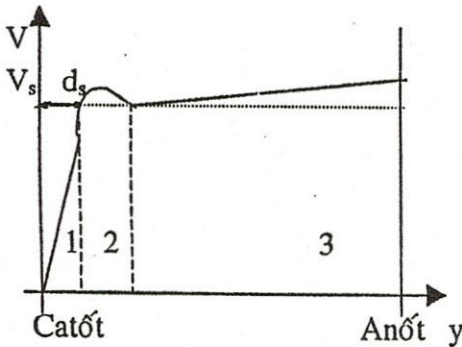
• Sự phân bố thế trong miền phóng điện được mô phỏng theo hình 1 ; với 3 vùng <sup>[2]</sup>:

1 : Vùng sụt thế catốt  $V_K$  ; ở đó, cường độ điện trường  $E_K = V_K / d_s$  ; còn  $d_s$  - khoảng sụt thế catốt .

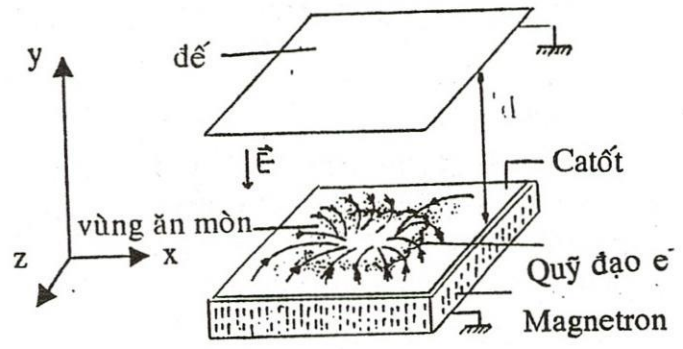
2 : Vùng ion hóa của plasma , ở đó cường độ điện trường  $E \ll E_k$  .

3 : Vùng plasma điện tử ;  $E \ll E_k$  .

Với mô hình phân bố đơn giản này điện tử ( $e^-$ ) phát xạ thứ cấp từ catốt, đầu tiên chúng rơi vào miền trường điện từ trực giao nhau . Quỹ đạo của chúng là cycloide . Để phóng điện đạt tối ưu , độ cao cực đại  $h_y$  của quỹ đạo này phải luôn lớn hơn  $d_s$ .



Hình 1



Hình 2. Sơ đồ nguyên tắc hệ magnetron

Do đó , sau khi được gia tốc trong miền sụt thế Catốt tất cả điện tử đều đi vào miền ion hóa và tham gia ion hóa chất khí . Ion sinh ra do ion hóa được gia tốc trong miền sụt thế Catốt và thực hiện chức năng phun xạ . Còn điện tử chuyển động tịnh tiến theo hướng trực giao với trường  $[ E , B ]$  , theo quỹ đạo kín hình ovan của vùng ăn mòn bia như được chứng tỏ ở hình 2 . Điều đó sẽ bảo đảm xác suất va chạm của  $e^-$  với hạt khí bằng 1, và phóng điện sẽ tồn tại với áp suất đủ thấp .Sau khi va chạm không đàn hồi , điện tử mất hầu hết năng lượng , dưới tác dụng của điện trường  $E$  chúng sẽ đi dần đến Anốt.

Để tìm dòng phóng điện  $J_a$  , cần xuất phát từ 3 phương trình

$$\begin{aligned} \Delta V &= 4 \cdot \pi \cdot \rho_e ; & (1) \\ J_a &= \rho_e \cdot v_e ; & (2) \\ v_e &= \mu_{e\perp} \cdot E ; & (3) \end{aligned}$$

với các điều kiện biên :

$$\begin{aligned} V \Big|_{y=0} &= 0 ; & (4) \\ \frac{dV}{dy} \Big|_{y=0} &= 0 ; & (5) \end{aligned}$$

ở đó  $\rho_e, v_e, \mu_{e\perp}$  - mật độ, vận tốc và độ linh động của điện tử trong miền phóng điện. Từ điều kiện dừng :

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t} = 0$$

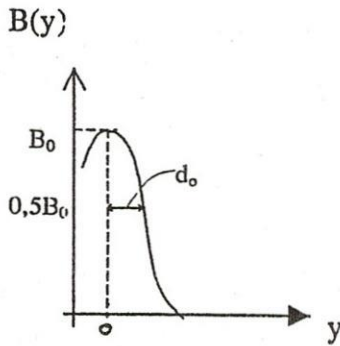
ta có:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (6)$$

Từ đó đối với hệ phẳng  $J(y) = \text{const}$ . Độ linh động của điện tử  $\mu_{e\perp}$  khi có từ trường bằng [3]:

$$\mu_{e\perp} = \frac{\mu_0}{1 + \left(\frac{\omega_{He}}{\gamma_m}\right)^2}; \quad (7)$$

ở đó,  $\mu_0$  - độ linh động của điện tử khi từ trường bằng không,  $\gamma_m$ - tần số va chạm giữa điện tử và nguyên tử khí,  $\omega_{He} = \{e \cdot B(y)\} / m_e \cdot c$ , với  $B(y)$  là từ trường song song với bề mặt Catốt và nó giảm từ bia đến đế theo qui luật được mô tả như hình 3 [1].



**Hình 3**

Một cách gần đúng, ta xem  $B(y)$  xấp xỉ dạng hàm sau :

$$B(y) = \frac{B_0}{1 + \left(\frac{y}{d_0}\right)^2}$$

ở đó,  $B_0$  - giá trị cực đại của  $B(y)$ ;  $d_0$  - độ bán rộng của đường cong  $B(y)$

Giả sử cường độ từ trường lớn đến mức, để

$$\omega_{He} \gg \gamma_m$$

$$\mu_{e\perp} = \frac{\mu_0 \cdot \gamma_m^2}{\omega_{He}^2}$$

Khi đó (7) xấp xỉ bằng :

Trong phóng điện Ar với năng lượng điện tử  $> 10$  eV thì [3]:

ở đó,  $\gamma_{m1}$ - tần số va chạm của điện tử khi  $p = 1$  torr .

Giải (1), (2), (3) với các điều kiện (4), (5), (6) và (7) ta có :

$$\frac{d^2 V}{dy^2} = \frac{4\pi J_e \cdot e \cdot B_0^2}{m_e \cdot \gamma_{m1} \cdot \gamma_m \cdot m_e \cdot c^2 \cdot \left(1 + \frac{y^2}{d_0^2}\right)^2} \cdot \frac{dV}{dy}$$

Tiến hành lấy tích phân theo  $dy$  thì ta nhận được :

$$J_a = \frac{\gamma_{m1} \cdot p \cdot m_e \cdot c^2 \cdot V_a^2}{4\pi e \cdot d_0^2 \cdot A^2 B_0^2}$$

$$A = \int_0^d \left[ \frac{y}{d_0^2 + y^2} + \frac{1}{d_0} \cdot \text{arctg} \frac{y}{d_0} \right]^{\frac{1}{2}} dy$$

Tích phân A tính bằng phương pháp giải tích được mô tả như hình 4 : (với  $d_0$  của hệ MP trong công trình <sup>[1]</sup> = 1.4 cm)

Hay

$$\frac{J_a}{P} = \frac{0,84 \cdot V_a^2}{d_0^2 \cdot A^2 \cdot B_0^2} \left( \frac{A}{\text{cm}^2 \cdot \text{Pa}} \right)^{(8)}$$

Trong biểu thức này  $J_a/p$  là hàm của  $V_a^2/B_0^2$ . Thông số này sẽ được bàn luận ở phần II.

### II.1.2. BÀN LUẬN KẾT QUẢ VÀ SO SÁNH THỰC NGHIỆM

A. Để xác định điều kiện giới hạn của từ trường  $B_0$  trong (8) ta xuất phát từ giả thuyết thứ nhất :

$$D_{e\perp} < D_{i\perp};^{(9)}$$

ở đó ,

$$D_{j\perp} = \frac{D_j^0}{1 + \left( \frac{\omega_{Hj}}{\gamma_{mj}} \right)^2}$$

Với j - điện tử và ion tương ứng . Ở đây chỉ khảo sát cường độ từ trường  $B_0$  trong miền từ hóa điện tử  $(\omega_{He}/\gamma_{me})^2 \gg 1$ , nhưng không từ hóa ion, vì nếu B lớn đến mức để từ hóa cả ion thì sẽ sinh ra hiện tượng bất ổn định diocotron <sup>[4-5]</sup>. Do đó :

$$\frac{D_e^0}{\left( \frac{\omega_{He}}{\gamma_{me}} \right)^2} < \frac{D_i^0}{1 + \left( \frac{\omega_{Hi}}{\gamma_{mi}} \right)^2}$$

ở đó,  $D_e^0, D_i^0$  là hệ số khuếch tán của điện tử và ion khi từ trường  $B = 0$ ;  $\omega_{Hi} = (e \cdot B)/m_i \cdot c$ ,  $\gamma_{mi}$  - tần số larmor và tần số va chạm của ion Ar với nguyên tử khí . Theo hệ thức Einstein <sup>[3]</sup> :

$$D_{i,e} = \frac{2}{3} \cdot \mu_{i,e} \cdot \overline{U_{i,e}}$$

ở đó,  $\mu_i$  - độ linh động của ion,  $\overline{U_{i,e}}$  - năng lượng trung bình của ion và điện tử .

Thay các giá trị trên vào (9) ta nhận được :

$$\frac{B_0}{C} > \frac{\left( \overline{U_e} \right)^{1/2} \cdot P}{\left( \overline{U_i} \cdot \mu_i \cdot \mu_e - \overline{U_e} \mu_i^2 \right)^{1/2}} \quad (10)$$

Với  $V_a \approx 600$  V ;  $p \approx 10^{-3}$  torr thì  $\overline{U_e} \approx 10$  eV <sup>[6]</sup>. Theo <sup>[7]</sup>  $\mu_i \approx 0,16$  m<sup>2</sup>/V.s.torr và  $\mu_e \approx 36$  m<sup>2</sup>/V.s.torr. Giả sử nhiệt độ ion bằng nhiệt độ khí làm việc trong hệ magnetron (300°C), do đó  $\overline{U_i} \approx 0,049$  eV. Đưa các giá trị trên vào (10) ta nhận được  $B_0 > 190$  Gauss . Thực nghiệm <sup>[6]</sup> chứng tỏ rằng với  $p \approx 10^{-3}$  torr,  $V \approx 1$  KV thì đặc trưng Volt - Ampere không còn tuân theo dạng  $I \sim V^n$  ( $n = 5 \div 9$ ) bắt đầu với  $B_0 \approx 200$  Gauss . Như vậy điều kiện (10) khá phù hợp với thực nghiệm .

B. Từ giả thuyết thứ 2, để phóng điện đạt tối ưu, tức là tất cả e<sup>-</sup> phát xạ thứ cấp đều đi vào vùng ion hóa thì :

$$e.E_K.h_y = eV_i \quad (11)$$

ở đó,  $h_y = 2.m.E_K/e.B_0^2$  và  $V_i$  là thế ion hóa của khí làm việc. Đưa  $h_y$  vào (11) ta

$$\frac{V_s}{B_0} = \left( \frac{e.V_i}{2.m_e} \right)^{1/2} .d_s = const. \quad (12)$$

được

ở đó,  $d_s$  có thể xem là hằng số<sup>[8]</sup> khi  $p \leq 10^{-3}$  torr và  $V_s \approx V_a$  (xem hình 1).

Thực nghiệm<sup>[1],[6]</sup> đã cho thấy rằng  $V_a/B_0 \approx (2 \div 5)$ . Theo<sup>[2]</sup> nếu  $p \leq 10^{-3}$  torr thì  $d_s = 0.01$ cm do đó, từ (12) ta được  $V_a/B_0 \approx 30$ .

Trong thực tế không phải tất cả  $e^-$  phát xạ thứ cấp đều đi vào miền ion hóa, và  $B_0$  gần bề mặt catốt bị giảm do dòng Hall, nên đã có sự khác nhau giữa lý thuyết và thực nghiệm như trên.

Tóm lại với lý thuyết trên ta rút ra được hai kết luận sau:

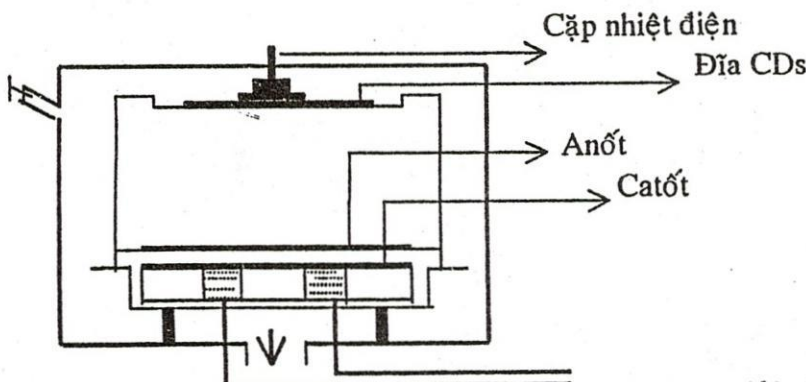
1. Với  $V_a$  và  $B_0$  cho trước thì  $J_a/p = const$  ;
2. Với  $B_0$  cho trước, thì  $J_a/p$  là hàm bậc 2 của  $V_a$ .

Thực nghiệm<sup>[1]</sup> chứng tỏ rằng, 2 kết luận trên khá phù hợp với hệ MP có từ trường lớn ( $B > 1000$  Gauss) và áp suất thấp ( $P < 10^{-3}$  torr). Điều đó khẳng định giả thuyết về điện tích âm của không gian phóng điện MP cân bằng ở áp suất thấp là đúng. Thực vậy, trong hệ MP thông thường, do mật độ điện tích không gian  $\rho = n_e + n_i = 0$  nên chúng chuyển động về anốt bằng quá trình khuyết tán lưỡng cực. Từ đó đặt trưng Volt - Ampere thỏa qui luật  $I_a \sim V_a^n$ <sup>[6]</sup> và tồn tại thế nổi  $V_f = KT_e/e.ln(m_i/m_e)^{1/2}$ <sup>[3]</sup> nếu hàm phân bố theo năng lượng của điện tử là Maxwell. Do đó, để được cấp nhiệt một cách liên tục bởi sự bắn phá của ion.

Ngược lại, trong hệ MP cân bằng ở áp suất thấp, do hiệu ứng bẫy điện tử gần bề mặt catốt lớn nên  $\rho = n_e$  và plasma điện tử sẽ cách điện với đế. Điều đó cho phép ta xem tương tác giữa plasma với bề mặt đế là không đáng kể.

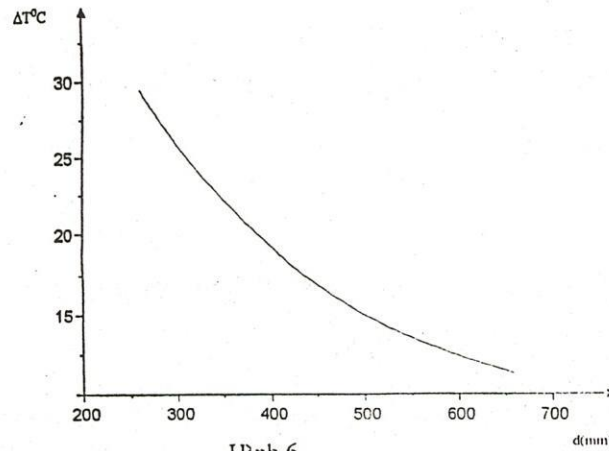
Để khẳng định điều vừa nói trên, công trình này tiến hành đo nhiệt độ đế theo khoảng cách  $d$  của hệ MP cân bằng dưới áp suất thấp (hình 5). Hệ MP của phòng thí nghiệm chúng tôi dùng nam châm vĩnh cửu có độ rộng 2.54 cm các cực cách nhau

3.81 cm. Cường độ từ trường  $B_0$  trên bề mặt bia cỡ 1800 Gauss. Thế Anốt - Catốt khoảng 600 Volt, cường độ dòng phóng điện 1,4÷1,6(A). Khoảng cách từ bia đến đế thay đổi từ 2,6 cm đến 6,6 cm. Bia là vật liệu Nhôm (Al) có diện tích 18.18 cm<sup>2</sup>. Nhiệt độ đế được đo bằng cặp nhiệt điện. Thời gian đo khoảng 5 phút. Kết quả thí nghiệm được trình bày trên hình 6. Từ hình 6 thấy rằng khi  $d = 5,6$ cm thì nhiệt độ đế  $T_s \approx 45^{\circ}C$ . Do đó, CDs không bị biến dạng trong quá trình kim loại hóa.



Hình 5

Nước giải nhiệt

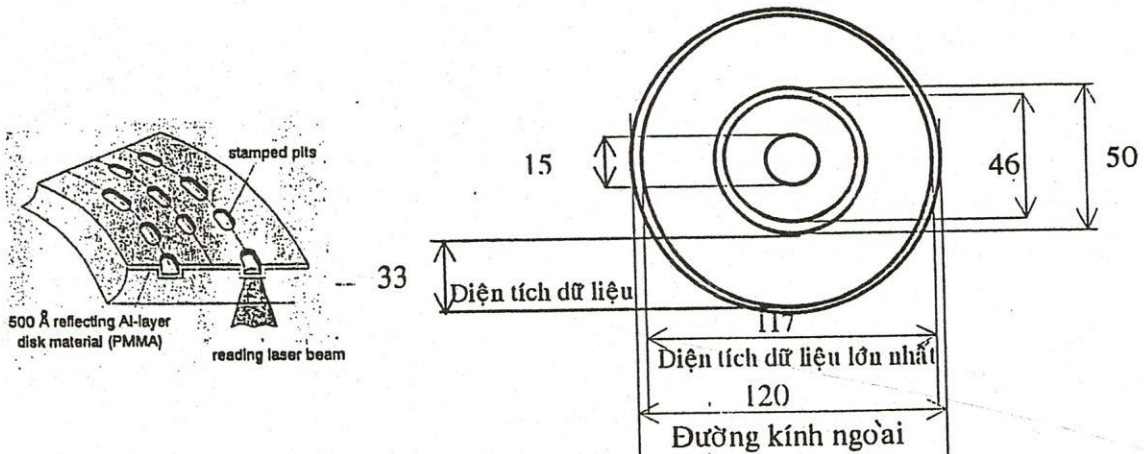


Hình 6

### II.3 ỨNG DỤNG HỆ MP CÂN BẰNG ĐỂ KIM LOẠI HÓA MÀNG AI TRÊN CD<sub>S</sub>

#### II.3.1 Cấu tạo đĩa Compact – Disks

Mặt cắt và chính diện một đĩa Compact – Disks được mô tả như hình 7a và 7b



Hình 7a&7b: Mặt cắt & chính diện 1 CD

Đĩa Compact được làm từ vật liệu PMMA hay Polycarbonat với đường kính 120mm, bề dày 1,2mm; một lớp phản xạ được phủ lên bề mặt đĩa với hệ số phản xạ lớn hơn 70%<sup>[9]</sup>.

PMMA (hay Polycarbonat) là loại Polime rất nhạy cảm với plasma và biến dạng ở nhiệt độ cao. Để đĩa (đã khắc dữ liệu) không bị biến dạng trong quá trình kim loại hóa, nhiệt độ để T<sub>s</sub> phải thấp.

Sơ đồ thí nghiệm và các thông số phóng điện tương tự như phần khảo sát nhiệt độ. Khoảng cách đặt đế là 5,6 cm áp suất khí còn lại trong hệ chân không là 10<sup>-5</sup> torr, áp suất khí Ar trong quá trình kim loại hóa là 10<sup>-3</sup> torr. Kiểm soát độ dày màng bằng phương pháp dao động tinh thể thạch anh với thiết bị XT/2. Với các thông số vật lý và phóng điện trên, nhiệt độ T<sub>s</sub> ≈ 45°C và vận tốc lắng đọng Al trên đế CD<sub>S</sub> cỡ 200Å/s.

#### II.3.2 KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM

Chúng tôi đã tiến hành kim loại hóa màng Al trên 10 đĩa CD<sub>S</sub> với độ dày màng (L) thay đổi từ 100 Å<sup>0</sup> đến 1000 Å<sup>0</sup>. Kết quả cho thấy:

- Với L < 300 Å<sup>0</sup>, âm thanh không đều trên toàn đĩa và có hiện tượng nhảy trục.

- Với  $L \geq 300 A^0$ , bằng thính giác thường không thể phân biệt được độ méo dạng của âm thanh, không xảy ra hiện tượng nhảy trắc.

- Phổ phản xạ của màng nhôm trên các đĩa có  $L \geq 300 A^0$  hoàn toàn giống phổ phản xạ của đĩa CDs do Công ty Sài Gòn – Audio sản xuất.

- Kiểm tra bằng thiết bị chuyên dùng cho thấy các đĩa của chúng tôi có một số lỗi, nhưng lỗi do tình trạng đĩa trước khi kim loại hóa (Kết luận của Công ty Sài Gòn – Audio).

### III KẾT LUẬN :

- Đã xây dựng được lý thuyết về dòng phóng điện của hệ Magnetron cân bằng làm việc ở áp suất thấp ( $< 10^{-3}$  torr). Chứng tỏ rằng, hệ MP này có những thông số đặc trưng hoàn toàn khác với những MP thông thường làm việc ở áp suất lớn hơn  $10^{-3}$  torr :  $I_a \sim V_a^2$ ;  $I_a/p = \text{const}$ ; bề mặt đế không bị đốt nóng. Nguyên nhân cơ bản của sự khác nhau đó là do có sự dịch chuyển không gian điện tích của plasma từ giả trung hòa  $n_i \approx n_e$  ở hệ MP thường sang điện tích không gian điện tử khi từ trường lớn và áp suất thấp. Kết quả tính toán phù hợp với thực nghiệm nhận được từ công trình<sup>[1]</sup> và của phòng thí nghiệm chúng tôi.

- Đã dùng hệ MP trên để kim loại hóa màng Al trên đĩa CDs với vận tốc lắng đọng  $200 A^0/s$ . Chứng tỏ rằng dùng hệ MP trên để phủ màng cho các loại đế Polime hoặc đế có nhạy cảm với nhiệt độ là rất phù hợp.

### A LOW-PRESURE PLANAR MAGNETRON WITH BALANCING THE MAGNETS AND APPLICATION OF THIS DEVICE TO THE METALLIZATION OF CDS.

Dao Vinh Ai-Nguyen Huu Chi-Le Tran

**ABSTRACT** : This paper demonstrates the possibility of developing a low-presure planar magnetron discharge. The space charge in this region as the negative state. Theoretical caculation show that, the discharge intensity  $I_a/p \sim V_a^2/B^2$  and discharge can be sustained at hight – vacuum. Such results have been experimetally verified. This magnetron was confirmed in this work to be a true low-temperature coating process quite suitable for plastics and other temperature sensitive substrates.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. Ishibashi and N. Hosokawa - High vacuum planar magnetron discharge - J. Vac. Sci. Technol. A. Vol 10. No 6. Nov/Dec. 1993.
- [2]. S. Schiller, U. Heisig - J. Vac. Sci. Technol, Vol 14, No 3, May/June 1977.
- [3]. Nguyễn Hữu Chí - Vật Lý Plasma - NXB ĐHTH 1995.
- [4]. R. F. Mukhamedov, Sov-Phys. Technol. phys. 18, 1075 1974.
- [5]. W. Knauer and R. L. Poeschel, Proceedings of the 7th international Conference on phenomena in Ionized Gases, Belgrade (1966), Vol. 2, P. 719.
- [6]. John A Thornton - Magnetron sputtering - J. Vac. Sci. Technol. A. Vol 15. No 2. March/April. 1978.
- [7]. S. c. Brown. Elementary processes in Gas-Discharge plasma, Atomizdat, Moscow 1961 (in Russian).

- [8]. Donald.L.Smith, Thin film deposition,NXB Mc.Graw-Hill,1995.
- [9]. S.Schurz,R.Lacher,S.R.Reincek,and R.Seiler -Thin film development and methods for compacts disks and laser disks manufacturing- J. Vac. Sci . Technol .A. Vol 10.No 4 .Jun/Aug/.1992 .
- [10]. Nguyễn Hữu Chí- Vật Lý Và Kỹ Thuật Chân Không -NXB ĐHTH 1995.