



(12) **BẢN MÔ TẢ GIẢI PHÁP HỮU ÍCH THUỘC BẢNG ĐỘC QUYỀN
GIẢI PHÁP HỮU ÍCH**

(19) **Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ**

(11)



2-0003992

(51) **H01P 1/00**
2024.01

(13) **Y**

(21) 2-2024-00465

(22) 30/11/2018

(67) 1-2018-05392

(45) 25/03/2025 444

(43) 25/02/2019 371A

(71) **TẬP ĐOÀN CÔNG NGHIỆP - VIỆN THÔNG QUÂN ĐỘI (VN)**

số 1 Trần Hữu Dực, Mỹ Đình 2, quận Nam Từ Liêm, thành phố Hà Nội

(72) Lê Đình An (VN); Nguyễn Đức Nhật (VN); Hoàng Mạnh Cường (VN); Cao Quang Hoàng (VN); Khổng Văn Mạnh (VN); Hoàng Đình Hải Truyền (VN); Phan Thanh Trung (VN); Đinh Văn Hải (VN).

(74) Công ty Luật TNHH quốc tế BMVN (BMVN INTERNATIONAL LLC)

(54) **BỘ LỌC THÔNG THẮP CÓ CẤU TRÚC ĐỒNG TRỤC SỬ DỤNG VẬT LIỆU
TEFLON VÀ ĐỒNG MẠ BẠC**

(21) 2-2024-00465

(57) Giải pháp hữu ích đề xuất bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon để sử dụng trong thiết bị thu phát trạm gốc trong hệ thống Tiến Hóa Dài hạn thế hệ thứ tư (4th Generation Long Term Evolution – 4G LTE) bao gồm:

thân chính làm bằng vật liệu đồng mạ bạc, có cấu trúc bao gồm ba đĩa đồng (5) (7) (9), hai thanh trụ đồng (6), (8) và thanh trụ nối vào (4), trong đó các đĩa đồng và các thanh trụ đồng này được ghép nối liên tiếp nhau và đồng trục với nhau;

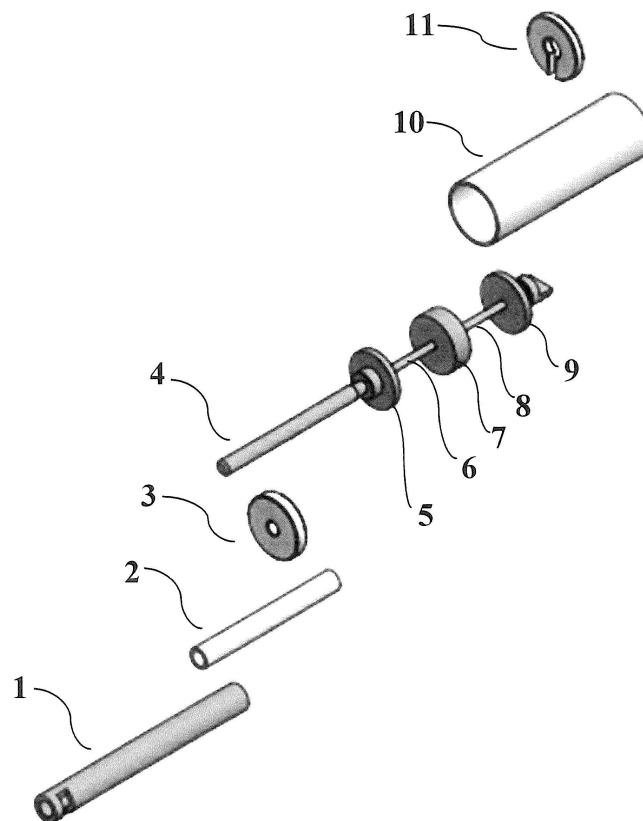
thân phụ (1) làm bằng vật liệu đồng mạ bạc, có cấu trúc trụ tròn rỗng ở giữa;

ống Teflon lớn (10) làm bằng vật liệu Teflon nằm giữa các đĩa đồng và khối đồng bao ngoài (12);

ống Teflon nhỏ (2) làm bằng vật liệu Teflon nằm giữa thân phụ (1) và thanh trụ đồng (4);

vòng chặn (3) làm bằng vật liệu Teflon, trong đó vòng chặn này được lắp ở giữa thân phụ này và thân chính này; và

vòng chặn (11) làm bằng vật liệu Teflon, trong đó vòng chặn này dùng để cách ly đĩa đồng của thân chính với bên ngoài.



Hình 1

Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Giải pháp hữu ích đề cập đến bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu Teflon và đồng mạ bạc để loại bỏ các tín hiệu siêu cao tần (Ultra High Frequency - UHF) không mong muốn tác động lên tín hiệu di động của trạm thu phát gốc trong hệ thống Tiến Hóa Dài hạn thế hệ thứ tư (4th Generation Long Term Evolution – 4G LTE). Dải tần số cắt lọc nằm trong khoảng từ 3 GHz đến 12,75 GHz để đảm bảo chỉ tiêu tuyến thu và tuyến phát theo tiêu chuẩn kỹ thuật hệ thống điện thoại di động trong Dự án Đối tác Thế hệ thứ 3 (3rd Generation Partnership Project - 3GPP).

Tình trạng kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Đặc thù của bộ lọc thu phát song công cao tần trong trạm thu phát gốc 4G LTE là tần số hoạt động cao (từ 0,7GHz đến 2,7GHz), yêu cầu công suất phát lớn và tổn hao nhỏ. Ngoài nhiệm vụ chọn lọc và tách gộp tín hiệu ở các tần số khác nhau để chọn đúng tín hiệu dữ liệu cần xử lý, bộ lọc thu phát song công còn có nhiệm vụ cắt các tín hiệu nhiễu và tín hiệu không mong muốn để không làm ảnh hưởng đến hoạt động của thiết bị hoặc các thiết bị khác sử dụng tần số lân cận (tín hiệu Viba, tín hiệu Wifi, tín hiệu nhiễu ngoài dải hoạt động...).

Bộ lọc song công của trạm thu phát gốc 4G LTE hiện nay được cấu trúc từ các hốc cộng hưởng nhằm đảm bảo suy hao nhỏ, công suất chịu đựng lớn và cách ly dải tần số lân cận cao. Tuy nhiên, các hốc cộng hưởng này ngoài việc cộng hưởng trong dải tần số hoạt động còn cộng hưởng ở các tần số cao hơn (các chế độ cộng hưởng phụ), do đó gây ra các điểm cộng hưởng không mong muốn trong dải tần số từ 3 GHz đến 12,75 GHz. Những điểm cộng hưởng này vô tình sẽ cho phép những tín hiệu nhiễu không mong muốn tại đúng tần số cộng hưởng phụ này lọt qua bộ lọc và đi vào thiết bị hoặc ngược lại gây ảnh hưởng đến hoạt động của thiết bị. Do đó, cần phải có một bộ lọc thông thấp cắt lọc các tín hiệu không mong muốn như nêu trên, đồng thời vẫn phải đảm bảo yêu cầu về tổn hao nhỏ trong băng tần tín hiệu và chịu được công suất lớn.

Các giải pháp mạch lọc thông thấp (Low Pass Filter – LPF) truyền thống thường sử dụng linh kiện tụ điện và cuộn cảm, hay bộ lọc bằng đường mạch in (Printed Circuit Board – PCB) đều không thể đáp ứng đồng thời được cả hai yêu cầu tổn hao nhỏ và chịu được công suất lớn. Lý do là các linh kiện này, đặc biệt là cuộn cảm có hệ số chất lượng (Quality factor - Q) nhỏ, điều này khiến cho năng lượng tiêu tán của bộ lọc lớn. Hơn nữa, với yêu cầu công suất chịu đựng của mạch lọc lên đến hơn 1000 W đồng nghĩa với kích thước linh kiện, hay mạch lọc PCB phải lớn, không đảm bảo yêu cầu tích hợp mạch lọc thông thấp vào bộ thu phát song công (Duplexer – DUP).

Bản chất kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Để giải quyết nhu cầu cần có một bộ lọc thông thấp đồng thời đáp ứng được hai yếu tố tổn hao nhỏ và công suất chịu đựng lớn, các tác giả đã nghiên cứu và thiết kế cấu trúc bộ lọc dạng đồng trục có thể đáp ứng được yêu cầu nêu trên.

Giải pháp hữu ích đề xuất bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon bao gồm:

thân chính làm bằng vật liệu đồng mạ bạc, có cấu trúc bao gồm ba đĩa đồng, hai thanh trụ đồng và thanh trụ nối vào, trong đó các đĩa đồng và các thanh trụ đồng này được ghép nối liên tiếp nhau và đồng trục với nhau tạo thành hệ mạch hoạt động như thành phần tụ điện và cuộn cảm;

thân phụ làm bằng vật liệu đồng mạ bạc, có cấu trúc trụ tròn rỗng ở giữa tạo thành một bản cực tương đương của tụ điện;

ống Teflon lớn làm bằng vật liệu Teflon làm lớp điện môi giữa các đĩa đồng và khối đồng bao ngoài;

ống Teflon nhỏ làm bằng vật liệu Teflon có tác dụng tạo thành lớp điện môi giữa thân phụ và thanh trụ đồng;

vòng chặn làm bằng vật liệu Teflon, trong đó vòng chặn này được lắp ở giữa thân phụ này và thân chính này; và

vòng chặn làm bằng vật liệu Teflon, trong đó vòng chặn này dùng để cách ly đĩa đồng của thân chính với bên ngoài.

Bộ lọc thông thấp sử dụng vật liệu dẫn điện là đồng mạ bạc với độ dày mạ bạc được kiểm soát theo tính toán của hiện tượng dẫn bề mặt (skin effect) có tác dụng giúp giảm thiểu suy hao của bộ lọc đồng thời giảm thiểu chi phí sản xuất, vật liệu cách điện sử dụng Teflon nhằm giảm thiểu suy hao qua lớp điện môi giúp giảm thiểu suy hao của toàn bộ lọc.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Hình 1 là hình vẽ phối cảnh tháo lắp của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích.

Hình 2 là hình vẽ lắp ráp các chi tiết của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích.

Hình 3 là hình vẽ thể hiện mặt cắt ngang trục của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích.

Hình 4 là sơ đồ nguyên lý của mạch lọc thông thấp 5 bậc tương ứng với bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích.

Hình 5 là biểu đồ thể hiện đặc tính ma trận tán xạ (S-parameter) của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích.

Hình 6 là biểu đồ thể hiện kết quả mô phỏng đặc tính ma trận tán xạ (S-parameter) mô hình 3D của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích.

Hình 7 là hình vẽ thể hiện mật độ điện trường phân bố trên bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích trong điều kiện nối tải.

Hình 8 là hình vẽ thể hiện mật độ điện trường phân bố trên bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích trong trường hợp hở tải.

Hình 9 là hình vẽ hai chiều mô tả kích thước thân chính của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích.

Hình 10 là hình vẽ hai chiều mô tả kích thước thân phụ của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích.

Hình 11 là hình vẽ hai chiều mô tả kích thước ống Teflon nhỏ của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích.

Hình 12 là hình vẽ hai chiều mô tả kích thước vòng chặn 3 của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích.

Hình 13 là hình vẽ hai chiều mô tả kích thước ống Teflon lớn của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích.

Hình 14 là hình vẽ hai chiều mô tả kích thước vòng chặn 11 của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích.

Hình 15 là hình vẽ mô tả hiện tượng dẫn bề mặt (Skin-effect) và cấu trúc bề mặt.

Hình 16 là ảnh chụp thực tế của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon do VTTEK chế tạo.

Hình 17 là hình vẽ thể hiện đặc tính đường truyền của bộ lọc có cấu trúc đồng trục được đo bằng máy đo thực tế.

Mô tả chi tiết giải pháp hữu ích

Cấu trúc của bộ lọc thông thấp theo giải pháp hữu ích được mô tả theo các thành phần tách rời như được thể hiện trong Hình 1, hoặc được ghép nối với nhau như được thể hiện trong Hình 2. Bộ lọc này bao gồm nhiều đĩa đồng và thanh trụ đồng kết nối xen kẽ với nhau tạo thành cấu trúc mạch lọc thông thấp. Điểm đặc trưng của cấu trúc này là khả năng tăng hệ số chất lượng của các thành phần tụ điện và cuộn cảm. Theo đó, tổn hao của từng thành phần linh kiện tương đương rất nhỏ nên tổn hao tổng của bộ lọc thông thấp cũng rất nhỏ (nhỏ hơn 0,1 dB). Đồng thời, do cấu trúc từ các thành phần cơ khí nên công suất chịu đựng của bộ lọc cũng đảm bảo lớn hơn 1000 W.

Như được thể hiện trên Hình 1, bộ lọc theo giải pháp hữu ích có sáu chi tiết riêng biệt bao gồm thân chính, thân phụ 1, ống Teflon lớn 10, ống Teflon nhỏ 2, vòng chặn 3 và vòng chặn 11. Trong đó:

- Thân chính làm bằng vật liệu đồng mạ bạc bao gồm thanh trụ đồng 4, đĩa đồng 5, thanh trụ 6, đĩa đồng 7, thanh trụ 8, đĩa đồng 9. Các chi tiết này được ghép nối liên tiếp và đồng trục với nhau tạo thành một hệ mạch tương ứng như các thành phần tụ điện và cuộn cảm.
- Thân phụ 1 làm bằng vật liệu đồng mạ bạc có tác dụng tạo thành một bản cực tương đương của tụ điện nối vào.
- Ống Teflon lớn 10 làm bằng vật liệu Teflon có tác dụng tạo thành lớp điện môi giữa đĩa đồng 5, 7, 9 và khối đồng bao ngoài 12.
- Ống Teflon nhỏ 2 làm bằng vật liệu Teflon có tác dụng tạo thành lớp điện môi giữa thân phụ 1 và thanh trụ đồng 4.
- Vòng chặn 3 làm bằng vật liệu Teflon có tác dụng cách ly thân phụ và thân chính.
- Vòng chặn 11 làm bằng vật liệu Teflon có tác dụng cách ly thân chính với phần kết nối vào ra của bộ lọc.

Các chi tiết này được kết hợp lắp ghép lại với nhau như được thể hiện trong Hình 2. Thân phụ 1 được lồng vào ống Teflon nhỏ 2 và thanh trụ đồng 4 để tạo thành tụ điện tương đương nối vào, vòng chặn 3 cách ly giữa thân phụ 1 và các chi tiết của thân chính, các đĩa đồng 5, 7, 9 kết hợp cùng ống Teflon lớn 10 và khối đồng bao ngoài 12 để tạo thành tụ điện tương đương, các thanh trụ 6, 8 xen kẽ giữa các đĩa đồng 5, 7, 9 tương đương như những cuộn cảm.

Mặt cắt của bộ lọc thông thấp đồng trục theo giải pháp hữu ích được thể hiện trong Hình 3, bao gồm đĩa đồng 7 có độ dày là l_2 và có đường kính là D_2 được lồng trong khối đồng bao ngoài 12 với đường kính bao ngoài là D_3 , giữa đĩa đồng 7 này và khối đồng bao ngoài 12 này có lớp điện môi cách điện 10 có hệ số điện môi là ϵ . Với kết cấu này, bề mặt bên ngoài của đĩa đồng 7 có tác dụng như một bản cực của tụ điện, bề mặt bên trong của khối đồng bao ngoài 12 có tác dụng như bản cực còn lại. Nhờ đó, tạo thành tụ điện tương đương với giá trị điện dung (capacitance – C) được tính theo công thức sau:

$$C = \frac{2\pi\epsilon l_2}{\ln(D_3/D_2)} \quad (i)$$

Cũng được thể hiện trong Hình 3, thanh trụ đồng 6 có độ dài là l_1 và đường kính thanh trụ là D_1 . Khối đồng bao ngoài 12 có đường kính trong là D_3 sử dụng vật liệu Teflon với độ từ thẩm là μ_0 . Với kết cấu này, thanh đồng sẽ tương đương như cuộn cảm có giá trị điện cảm (inductor – L) được tính theo công thức sau:

$$L = \frac{\mu_0 l_1}{2\pi} * \ln(D_3/D_1) \quad (ii)$$

Các công thức trên có thể áp dụng để tính toán điện dung và điện cảm tương ứng được tạo thành bởi các đĩa đồng 5, 7, 9 và thanh trụ đồng 6, 8 với các kích thước tương ứng. Đồng thời, cũng có thể tính ngược lại từ giá trị điện dung và điện cảm tương ứng để suy ra kích thước cơ khí của đĩa đồng và thanh trụ đồng.

Bộ lọc thông thấp đồng trục theo giải pháp hữu ích có thể được biểu diễn tương đương mạch lọc thông thấp (lowpass filter – LPF) dưới dạng tụ điện và cuộn cảm như được thể hiện trong Hình 4, trong đó:

- Tụ điện C4 được tạo ra từ thân phụ 1 và thanh trụ đồng 4 với điện môi là ống Teflon nhỏ 2.
- Tụ điện C1 được tạo ra từ đĩa đồng 5 và khối đồng bao ngoài 12 với điện môi là ống Teflon lớn 10.
- Cuộn cảm L1 được tạo ra từ thanh trụ đồng 6.
- Tụ điện C2 được tạo ra từ đĩa đồng 7 và khối đồng bao ngoài 12 với điện môi là ống Teflon lớn 10.
- Cuộn cảm L2 được tạo ra từ thanh trụ đồng 8.
- Tụ điện C3 được tạo ra từ đĩa đồng 9 và khối đồng bao ngoài 12 với điện môi là ống Teflon lớn 10.

Mạch lọc thông thấp này có tần số cắt là f_c , khi tín hiệu đi qua mạch lọc, các tín hiệu ở tần số thấp hơn tần số f_c được cho qua, các tín hiệu ở tần số lớn hơn tần số f_c bị suy hao và chặn lại.

Điểm đặc biệt của bộ lọc thông thấp sử dụng cấu trúc đồng trục với vật liệu đồng mạ bạc và Teflon theo giải pháp hữu ích là khả năng cắt lọc ở tần số cao, đồng thời tổn hao lên tín hiệu có ích chạy qua mạch lọc nhỏ và công suất chịu đựng lớn.

Tổn hao của bộ lọc (insertion loss - IL) là tổn hao tác động lớn nhất lên tín hiệu nằm trong dải tần số bộ lọc cho phép đi qua (tần số nhỏ hơn f_c). Bản chất tổn hao này được cấu thành từ tổn hao của thành phần dẫn điện (conductive loss – P_w) và tổn hao của thành phần cách điện (dielectric loss – P_D). Tổn hao của bộ lọc (IL) được tính là số lần suy giảm công suất đầu vào bộ lọc so với công suất đầu ra, được tính theo đơn vị dB.

$$IL = 10 * \log \frac{P_{in}}{P_{out}} \quad (dB) \quad (iii)$$

Trong đó:

P_{in} là công suất đầu vào;

P_{out} là công suất đầu ra;

Gọi công suất tổn hao trên bộ lọc là P_L thì: $P_L = P_{in} - P_{out}$

Theo đó, tổn hao của bộ lọc là:

$$IL = 10 * \log \left(\frac{P_L + P_{out}}{P_{out}} \right) \quad (dB) \quad (iv)$$

Công suất tổn hao P_L càng nhỏ tương ứng tổn hao IL càng ít.

Công suất tổn hao $P_L = P_w + P_D$.

Với P_w là công suất tổn hao của thành phần dẫn điện (conductive loss). P_D là công suất tổn hao của thành phần cách điện (dielectric loss) và được tính theo công thức sau:

$$P_D = \pi * f * \tan(\delta) * \epsilon_0 * \epsilon_r * \int |\vec{E}|^2 dV \quad (v)$$

$$P_W = \frac{1}{2} * \sqrt{\frac{\pi * \mu * f}{\sigma}} * \int |\vec{H}|^2 dS \quad (vi)$$

trong đó:

- f là tần số của tín hiệu chạy qua (frequency);
- $\tan(\delta)$ là hệ số tiêu tán của vật liệu điện môi, ở đây là Teflon;
- ϵ_0 là hằng số điện môi tuyệt đối của không khí;
- ϵ_r là hằng số điện môi tuyệt đối của vật liệu điện môi, ở đây là Teflon;
- E là điện trường tạo ra bởi đĩa đồng 1 và khối đồng bao ngoài;
- μ là độ từ thẩm của vật liệu dẫn điện;
- σ là điện dẫn của vật liệu dẫn điện (electrical conductivity), $\sigma=1/\rho$;
- ρ là điện trở suất của vật liệu dẫn điện (electrical resistivity); và
- H là từ trường tạo ra bởi hiệu ứng bề mặt (skin-effect) trên vật liệu dẫn điện.

Bản chất, tổn hao công suất P_D là do tồn tại điện trường (Electric field – E) chủ yếu được tạo ra bởi lớp điện môi giữa mặt ngoài của đĩa đồng 5, 7, 9 và mặt trong của khối đồng bao ngoài 12. Trong công thức (v), có thể thấy rằng ngoài các thành phần không đổi như tần số f , điện môi ϵ_0 , điện trường E (do giá trị điện dung để tạo ra mạch lọc không đổi), còn có hai thành phần là hằng số điện môi vật liệu ϵ_r và hệ số tiêu tán của vật liệu $\tan(\delta)$ sẽ ảnh hưởng đến giá trị tổn hao công suất P_D . Hai thành phần này được quyết định bởi vật liệu làm chất điện môi. Giá trị này càng nhỏ, thì tổn hao công suất P_D càng nhỏ. Để tối ưu hóa giá trị tổn hao công suất P_D này, các tác giả đã lựa chọn vật liệu Teflon đáp ứng được cả hai yêu cầu này với $\epsilon=2,1$, $\tan(\delta)<5^{-4}$.

Bản chất của tổn hao công suất P_W là do tồn tại từ trường (Magnetic field – H) tạo ra bởi hiệu ứng bề mặt trên dây dẫn (skin-effect) tập trung chủ yếu trên các thanh trụ đồng 6 và 8. Tổn hao này chủ yếu là từ thành phần điện cảm L trong mạch. Trong công thức (vi) nêu trên, có thể thấy rằng ngoài các thành phần không đổi như tần số f , từ trường H (do giá trị điện cảm của mạch lọc không đổi), chỉ có điện dẫn σ (electrical conductivity) và từ thẩm μ thay đổi phụ thuộc vào loại vật liệu dẫn điện. Theo tính chất của vật liệu thì điện trở suất ρ (electrical resistivity) của bạc ($\rho_{Ag} = 1,59*10^{-8} \Omega m$) nhỏ hơn đồng ($\rho_{Cu} = 1,68*10^{-8} \Omega m$) cũng là kim loại có điện trở suất nhỏ nhất. Theo đó thì điện dẫn (electrical conductivity - σ) của bạc là lớn nhất: $\sigma_{Ag}=6,3*10^7$ (S/m) và của đồng là $\sigma_{Cu}=5,96*10^7$ (S/m). Chính vì vậy nếu sử dụng vật liệu bạc thì tổn hao P_W sẽ là nhỏ nhất.

Do đó, bộ lọc thông thấp đồng trục theo giải pháp hữu ích có tổn hao nhỏ do sử dụng vật liệu cách điện Teflon giảm thiểu tổn hao P_D và sử dụng vật liệu đồng mạ bạc giảm thiểu tổn hao P_W . Vì vậy suy hao tổng thể của bộ lọc theo giải pháp hữu ích là rất nhỏ ($<0,1$ dB).

Công suất chịu đựng chủ yếu phụ thuộc vào điện trường đánh thủng ống Teflon lớn 10 như được thể hiện trong Hình 1 do vị trí này có độ dày điện môi mỏng nhất trong toàn cấu trúc bộ lọc thông thấp. Với vật liệu Teflon, điện áp đánh thủng (breakdown voltage – E_{break}) của vật liệu này là $19,7 \cdot 10^6$ V/m. Bằng cách sử dụng các công cụ mô phỏng và tính toán, với mạch lọc thông thấp tương ứng với bộ lọc thông thấp đồng trục theo giải pháp hữu ích, xác định được khi công suất chạy qua mạch lọc là 1000W điểm có điện trường tích trữ lớn nhất trên mạch lọc là $7,18 \cdot 10^5$ V/m với trường hợp nối tải như được thể hiện trong Hình 7. Trong trường hợp hở tải, điểm có điện trường tích trữ lớn nhất trên mạch lọc là $1,4716 \cdot 10^6$ V/m như được thể hiện trong Hình 8. Các điện trường này đều nhỏ hơn điện trường đánh thủng của vật liệu Teflon $19,7 \cdot 10^6$ V/m. Chính vì vậy, công suất chịu đựng của mạch lọc này hoàn toàn có thể đáp ứng được 1000W.

Từ yêu cầu thực tế cần một bộ lọc thông thấp với tần số cắt f_c và tổn hao trong băng nhỏ hơn 0,1dB, các tác giả Giải pháp hữu ích đã xây dựng được mạch lọc thông thấp như được nêu trong Hình 4, đây là mạch lọc thông thấp 5 bậc.

Bộ lọc thông thấp đáp ứng yêu cầu nêu trên có giá trị linh kiện tương đương được nêu trong Bảng 1 dưới đây:

Bảng 1: Thông số của mạch lọc tương ứng với bộ lọc thông thấp theo giải pháp hữu ích

TT	Điện dung	Giá trị (pF)	Điện cảm	Giá trị (nH)
1	C1	1,21867	L1	5,7241
2	C2	3,32365	L2	5,7241
3	C3	1,21867		

Đặc tính đường truyền của bộ lọc nêu trên được thể hiện bởi ma trận tán xạ S (S-parameter) như được thể hiện trong Hình 5. Trong hình này, trục nằm ngang là giá trị tần số tăng dần từ trái qua phải. Trục dọc biểu thị cho lượng tổn hao khi tín hiệu chạy qua. Theo đặc tính đường truyền này, các điểm đo tại tần số hoạt động (điểm đo m1, m2) có tổn hao nhỏ hơn 0,1dB, tần số cao hơn từ 3GHz trở lên có suy hao lớn dần (các điểm đo m5, m6) trong khoảng tần số này suy hao đều lớn hơn 40dB. Đáp ứng của bộ lọc nhằm để cắt lọc các tín hiệu nhiễu ở tần số siêu cao tần nằm trong khoảng từ 3GHz đến 12,75GHz như nêu trên.

Với bộ giá trị của mạch lọc này, có thể tính toán tương đương được bộ thông số kích thước của bộ lọc cấu trúc đồng trục theo công thức (i) như sau:

Bảng 2: Bộ thông số kích thước của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích

TT	Tụ điện	Điện dung C (pF)	Đường kính vỏ D_3 (mm)	Đường kính đĩa đồng D_2 (mm)	Chiều dài đĩa đồng l_2 (mm)	Lớp điện môi
1	C1	1,21867	10	9	1,1	Teflon ($\epsilon = 2,1$)
2	C2	3,32365	10	9	3	Teflon ($\epsilon = 2,1$)
3	C3	1,21867	10	9	1,1	Teflon ($\epsilon = 2,1$)

Với cuộn cảm L, áp dụng công thức (ii), thu được bộ thông số kích thước của bộ lọc thông thấp đồng trục như sau:

Bảng 3: Bộ thông số kích thước của bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục theo giải pháp hữu ích

TT	Cuộn cảm	Điện cảm L (nH)	Đường kính thanh trụ D_I (mm)	Chiều dài trụ L_I (mm)
1	L1	1,21867	1,2	11
2	L2	3,32365	1,2	11

Bộ lọc thông thấp theo giải pháp hữu ích được đặt ngay cổng ra ăng-ten của bộ thu phát cao tần nên cần thiết kế cách ly điện một chiều (DC decoupling) giữa cổng ăng-ten và bộ thu phát song công. Hơn nữa, việc cách ly điện một chiều này còn phục vụ cho chức năng truyền tín hiệu điều khiển ăng-ten qua đường tín hiệu cao tần và cấp điện áp cho bộ điều khiển ăng-ten. Vì vậy, trong thiết kế mạch lọc trên sẽ được thêm một tụ nối tiếp nhằm cách ly điện một chiều, đồng thời có giá trị đủ để tín hiệu cao tần (tín hiệu 4G LTE trong dải tần từ 0,7GHz đến 2,7GHz) có thể chạy qua bình thường.

Trong đường truyền cao tần, việc phối hợp trở kháng (impedance matching) là tối quan trọng, nó giúp giảm thiểu suy hao đường truyền, tối thiểu tín hiệu phản xạ ở nguồn và đích. Trở kháng tại cổng ăng ten là 50Ω . Vì vậy kết nối vào ra của mạch lọc phải có trở kháng là 50Ω để đường truyền tín hiệu tối ưu nhất. Trở kháng của cáp đồng trục được tính theo công thức sau:

$$Z = 60 * \varepsilon * \ln \frac{D}{d}$$

trong đó:

- Z : trở kháng của cáp đồng trục (Ω);
- ε : hằng số điện môi;
- D : đường kính mặt trong của vỏ bao ngoài; và
- d : đường kính mặt ngoài của lõi.

Từ công thức này, kết hợp với kích thước vỏ $D = D_3 = 10\text{mm}$ như được tính toán trên đây, tính được kích thước lõi $d = 4,34\text{mm}$.

Sau khi hiệu chỉnh thiết kế kết hợp với bộ kết quả tính toán nêu trên, thu được bộ giá trị của bộ lọc thông thấp đồng trục theo một phương án của giải pháp hữu ích như sau:

Bảng 4: Bộ thông số kích thước của bộ lọc thông thấp đồng trục theo giải pháp hữu ích

TT	Tụ điện	Điện dung C (pF)	Đường kính vỏ D_2 (mm)	Đường kính đĩa đồng D_3 (mm)	Chiều dài đĩa đồng l_2 (mm)	Lớp điện môi
1	C1	1,21867	10	9	1,1	Teflon ($\varepsilon = 2,1$)
2	C2	3,32365	10	9	3	Teflon ($\varepsilon = 2,1$)
3	C3	1,21867	10	9	1,1	Teflon ($\varepsilon = 2,1$)
4	C4	8,4066	3,3	2,3	26	Teflon ($\varepsilon = 2,1$)

Để đánh giá khả năng chịu đựng công suất của bộ lọc thông thấp theo giải pháp hữu ích, các tác giả Giải pháp hữu ích đã thực hiện mô phỏng 3D. Nếu điện trường tích trữ trên tất cả các điểm trên bộ lọc này thấp hơn ngưỡng đánh thủng của Teflon ($E_{\text{break}} = 19,7 * 10^6 \text{V/m}$ – với những nơi cách ly teflon) thì bộ lọc này sẽ đảm bảo chịu được công suất tín hiệu đó chạy qua.

Đặt mức công suất đầu vào bộ lọc này là 1000W, xem xét hai trường hợp là nối tải và hở tải để mô phỏng đánh giá ảnh hưởng cũng như khả năng chịu đựng của bộ lọc.

Với trường hợp nối tải, kết quả mô phỏng mật độ điện trường tích trữ trên bộ lọc được thể hiện như trong Hình 8. Trong trường hợp này, điểm có điện trường tích trữ lớn nhất là

$7,18 \cdot 10^5 \text{V/m}$. Điện trường này nhỏ hơn nhiều so với mức điện trường đánh thủng của cả không khí và Teflon. Vậy trong trường hợp nổi tải, với công suất 1000W, bộ lọc đồng trục hoạt động bình thường.

Trong trường hợp hở tải, khi này sẽ có hiện tượng sóng đứng, có hiện tượng dội ngược lại công suất và cộng hưởng. Đây là trường hợp xấu nhất có thể xảy ra, điện trường tích trữ sẽ cao hơn trong trường hợp nổi tải. Kết quả mô phỏng trong trường hợp này được thể hiện trong Hình 9. Có thể thấy rằng mật độ điện trường tập chung ở hai đĩa nhỏ phía ngoài. Điểm có điện trường lớn nhất là $1,4716 \cdot 10^6 \text{V/m}$. Điện trường này đều nhỏ hơn mức đánh thủng của cả không khí và Teflon.

Vậy có thể kết luận bộ lọc thông thấp cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon hoàn toàn có thể chịu được mức công suất 1000W chạy qua.

Ví dụ thực hiện giải pháp hữu ích

Các tác giả đã tiến hành thử nghiệm bộ lọc thông thấp đồng trục theo giải pháp hữu ích cho tần số băng 3 (band-3 : 1,8GHz) theo tiêu chuẩn quốc tế 3GPP. Cụ thể như sau:

Bộ lọc được sử dụng bao gồm 6 chi tiết với các thông số cụ thể như sau:

- Như được thể hiện trên Hình 13, ống Teflon lớn được làm bằng vật liệu Teflon có chiều dài 30,2mm, đường kính trong 9,05mm, đường kính ngoài 9,95mm. Ống này có tác dụng làm lớp điện môi của các tụ C1, C2, C3.
- Như được thể hiện trên Hình 9, thân chính được làm bằng vật liệu đồng mạ bạc bao gồm các chi tiết chính như đĩa đồng của các tụ C1, C2, C3 và thanh trụ đồng L1, L2 của mạch lọc. Toàn bộ thân chính có độ dài 63,7mm, ba đĩa đồng 5, 7, 9 có đường kính 9mm; Hai thanh trụ đồng 6, 8 nối tiếp xen kẽ với 3 đĩa đồng, có đường kính 1,2mm dài 11mm; Thanh trụ nổi vào 4 có đường kính 2mm, độ dài 26mm. Tất cả các đĩa đồng và thanh trụ đồng được thiết kế đồng trục với nhau.
- Như được thể hiện trên Hình 14, vòng chắn 3 được làm bằng vật liệu Teflon, độ dày 2mm, đường kính ngoài 9,9mm, đường kính trong 2,08mm. Đây là vòng chắn cách ly phần đĩa đồng của bộ lọc và thân phụ.
- Như được thể hiện trên Hình 11, ống Teflon nhỏ được làm bằng vật liệu Teflon có chiều dài 26,5mm, đường kính trong 2,34mm, đường kính ngoài 3,26mm. Đây là lớp điện môi của tụ C4 trong mạch.
- Như được thể hiện trên Hình 10, thân phụ được làm bằng vật liệu đồng, mạ bạc dày $\geq 3\mu\text{m}$, có cấu trúc trụ tròn rỗng ở giữa kích thước chiều dài 38,3mm, đường kính ngoài 4,25mm, đường kính trong 3,3mm và độ sâu 27mm. Chi tiết này là vỏ ngoài của tụ cách ly điện một chiều C4 trong mạch lọc – tương đương như một bản cực của tụ điện C4. Thân phụ này được làm bằng vật liệu đồng. Đây là phần hàn nối trực tiếp với cổng ra ăng-ten.

- Như được thể hiện trên Hình 12, vòng chắn 11 làm bằng vật liệu Teflon, độ dày 1,5mm, đường kính ngoài 9,9mm, đường kính trong 3,1mm. Đây là vòng chắn cách ly phần đĩa đồng của bộ lọc.

Thân chính, thân phụ làm bằng vật liệu đồng có yêu cầu mạ bạc có chỉ tiêu mạ bạc được tính toán như sau:

Đặc tính của từ trường H càng tập chung ở phía ngoài dây dẫn nếu tần số hoạt động càng cao, đây được gọi là hiệu ứng bề mặt (skin effect). Vì vậy, để giảm chi phí, thay vì phải dùng toàn bộ vật liệu dây dẫn bằng bạc thì chỉ cần mạ phía bên ngoài dây dẫn bằng vật liệu bạc vừa giúp giảm thiểu giá thành, vừa đảm bảo chất lượng, giảm thiểu suy hao. Vấn đề là độ dày lớp mạ bao nhiêu là đủ. Hình ảnh mô tả hiệu ứng bề mặt được thể hiện trong Hình 15. Dòng điện (Electric current – I) chạy trong dây trụ sẽ tạo ra từ trường H.

Khi dòng I thay đổi, từ trường H thay đổi theo sinh ra các dòng điện từ cảm I_w . Các dòng tự cảm I_w xuất hiện làm chống lại tự tăng của dòng điện cao tần chạy trong lòng dây dẫn, làm thuận lợi cho sự tăng của dòng điện chạy trên bề mặt của dây dẫn đó.

Khi dòng điện có tần số càng cao, sự thay đổi của dòng điện I càng lớn dẫn đến các dòng tự cảm cản trở dòng điện bên trong lòng dây dẫn càng lớn và làm tăng dòng điện chạy trên bề mặt dây dẫn. Đây chính là nguyên nhân dòng điện cao tần hầu như chỉ chạy trên bề mặt ngoài của dây dẫn.

Độ dày này có thể tính toán được dựa vào công thức tính độ sâu của vật liệu mà ở đó tập chung phần lớn dòng điện ở tần số f gọi là độ sâu bề mặt dẫn (skin depth – d). Độ sâu này được tính theo công thức sau:

$$d = \sqrt{\frac{\rho}{\pi * \mu * f}} \quad (vii)$$

trong đó:

- d là độ sâu hiệu ứng bề mặt;
- ρ là điện trở suất;
- μ là độ từ thẩm của vật liệu dẫn điện;
- f là tần số của tín hiệu chạy qua.

Từ công thức nêu trên, có thể tính toán được độ dày của phần tập chung dòng cao tần. Giả sử ứng với tần số băng tần 3 (band 3, 4G-LTE) là 1,8GHz, độ dày (skin depth) mà ở đó tập chung chủ yếu dòng điện được nêu trong bảng dưới đây.

Bảng 4: Độ dày mặt ngoài của lớp vật liệu phủ dây dẫn

Vật liệu	Điện trở suất $\rho(\mu\Omega\text{m})$	Từ thẩm của vật liệu μ	Độ dày mặt ngoài (skin depth) $d(\mu\text{m})$
Đồng (Cu)	1,678	0,999991	1,54
Bạc (Ag)	1,586	0,99998	1,494

Như vậy, với vật liệu bạc, tín hiệu ở tần số 1,8GHz chỉ dẫn tập chung ở độ dày 1,494 μm bên ngoài dây dẫn.

Ngoài ra, trong quá trình mạ, cần quan tâm tới yếu tố độ nhám bề mặt của vật liệu. Độ dày lớp mạ phải lớn hơn độ nhám này thì chất lượng mạ mới đảm bảo yêu cầu. Mô tả độ nhám này được thể hiện trong Hình 15.

Độ nhám được đánh giá bằng thông số R_a hoặc R_z

R_a là sai lệch trung bình số học của các đỉnh nhấp nhô đo trên một chiều dài chuẩn .

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Trong đó n là số đỉnh có trong chiều dài tiêu chuẩn, y_i là độ cao của đỉnh thứ i.

R_z là chiều cao trung bình của 5 khoảng cách từ 5 đỉnh cao nhất đến 5 đỉnh thấp nhất trong giới hạn chiều dài chuẩn.

$$R_z = \frac{1}{5} \left[\sum_{i=1}^5 |y_{\max}| + \sum_{i=1}^5 |y_{\min}| \right]$$

Trong thực tế, độ nhám R_z của các chi tiết thân chính và thân phụ sau khi tiện là 3 μm .

Độ dày lớp mạ bạc phải đảm bảo cả hai yêu cầu là: lớn hơn độ sâu $d=0,1494\mu\text{m}$ (skin depth) và lớn hơn độ nhám $R_z = 3\mu\text{m}$. Nên chỉ tiêu tối thiểu của lớp mạ là 3 μm .

Bộ lọc thông thấp cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon được VTTEK thử nghiệm chế tạo như nêu trên được thể hiện trong Hình 16. Sử dụng máy đo phân tích mạng (Vector analyzer) để kiểm tra đặc tính đường truyền của bộ lọc thông thấp. Kết quả đo đặc tính đường truyền của bộ lọc thông thấp này được mô tả như Hình 17. Hình 17 là ảnh chụp màn hình của máy đo E5071C của hãng Keysight khi thực hiện phép đo đường truyền thực tế của bộ lọc thông thấp đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon. Trong hình là hai đường ma trận tán xạ (S-parameter) thể hiện đặc tính suy hao của bộ lọc (Tr1 S21) và đặc tính phản xạ của bộ lọc (Tr2 S11). Để đánh giá đặc tính suy hao của bộ lọc ta có các điểm đo và kết quả đo như trong Bảng 5 dưới đây

Bảng 5: Kết quả đo thực tế đặc tính suy hao của bộ lọc

Điểm đo	Đặc tính đường truyền	Tần số	Giá trị đo	Đánh giá
2	Suy hao	1,8669673GHz	-0,0937dB	Đạt
3	Suy hao	1,7579593GHz	-0,0778dB	Đạt
4	Suy hao	1,71GHz	-0,0938dB	Đạt
5	Suy hao	1,9288195GHz	-0,0186dB	Đạt
6	Suy hao	8,8978686GHz	-41,753dB	Đạt

Để đánh đặc tính phản xạ của bộ lọc ta có các điểm đo và kết quả đo như trong Bảng 6 dưới đây

Bảng 6: Kết quả đo thực tế đặc tính suy hao của bộ lọc

Điểm đo	Đặc tính đường truyền	Tần số	Giá trị đo	Đánh giá
2	Phản xạ	1,8669673GHz	-13,604dB	Đạt
3	Phản xạ	1,7579593GHz	-12,943dB	Đạt
4	Phản xạ	1,71GHz	-12,681dB	Đạt
5	Phản xạ	1,9288195GHz	-13,261dB	Đạt
6	Phản xạ	8,8978686GHz	-9,2115dB	Đạt

Kết quả đo kiểm cho thấy suy hao của bộ lọc trong dải tần số hoạt động (0,7GHz-2,7GHz) đều nhỏ hơn 0,1dB, đạt yêu cầu. Suy hao lớn nhất trong dải tần số từ 3GHz đến 12,5GHz thể hiện ở điểm đo 6 với giá trị suy hao là -41,753dB nhỏ hơn chỉ tiêu -40dB đặt ra. Như vậy bộ lọc hoàn toàn đáp ứng được yêu cầu thiết kế đặt ra.

Hiệu quả đạt được của giải pháp hữu ích

Bộ lọc thông thấp cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon có chức năng cắt lọc các tín hiệu cao tần ra khỏi tín hiệu thu và phát của khối thu phát cao tần (RRU – Radio Remote Unit) của trạm thu phát gốc tín hiệu 4G-LTE. Bộ lọc này nhờ việc sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon nên tổn hao đường truyền nhỏ (<0,1dB) và chịu được công suất lớn (>1000W). Đáp ứng hoàn toàn yêu cầu cắt lọc đầu cuối ra ăng-ten của bộ thu phát cao tần (RRU).

Ngoài ra với cấu trúc đồng trục nhỏ gọn, bộ lọc được tích hợp luôn ngay công ra ăng-ten của bộ lọc thu phát song công (Duplexer) nằm trên khối thu phát cao tần.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Bộ lọc thông thấp có cấu trúc đồng trục sử dụng vật liệu đồng mạ bạc và Teflon bao gồm:

thân chính làm bằng vật liệu đồng mạ bạc, có cấu trúc bao gồm ba đĩa đồng (5) (7) (9), hai thanh trụ đồng (6), (8) và thanh trụ nối vào (4), trong đó các đĩa đồng và các thanh trụ đồng này được ghép nối liên tiếp nhau và đồng trục với nhau tạo thành hệ mạch hoạt động như thành phần tụ điện và cuộn cảm;

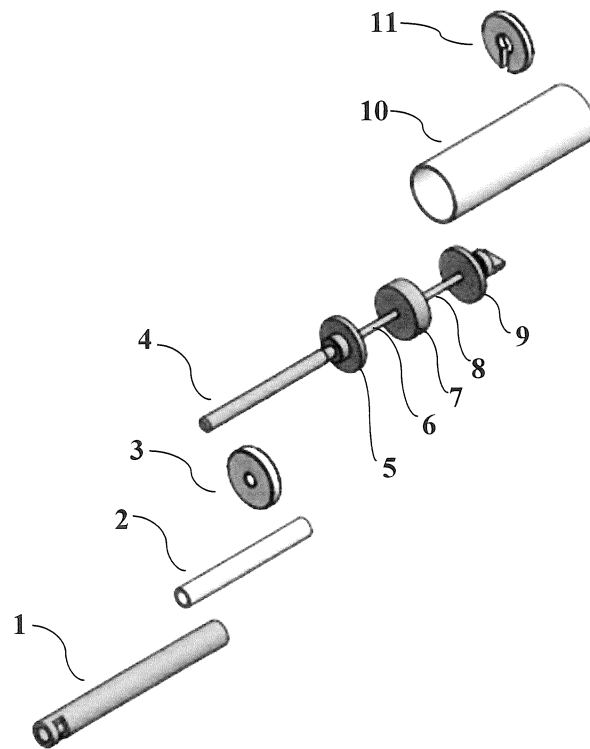
thân phụ (1) làm bằng vật liệu đồng mạ bạc, có cấu trúc trụ tròn rỗng ở giữa tạo thành một bản cực tương đương của tụ điện, có tác dụng cách ly điện một chiều giữa bộ lọc và bên ngoài;

ống Teflon lớn (10) làm bằng vật liệu Teflon làm lớp điện môi giữa các đĩa đồng và khối đồng bao ngoài (12);

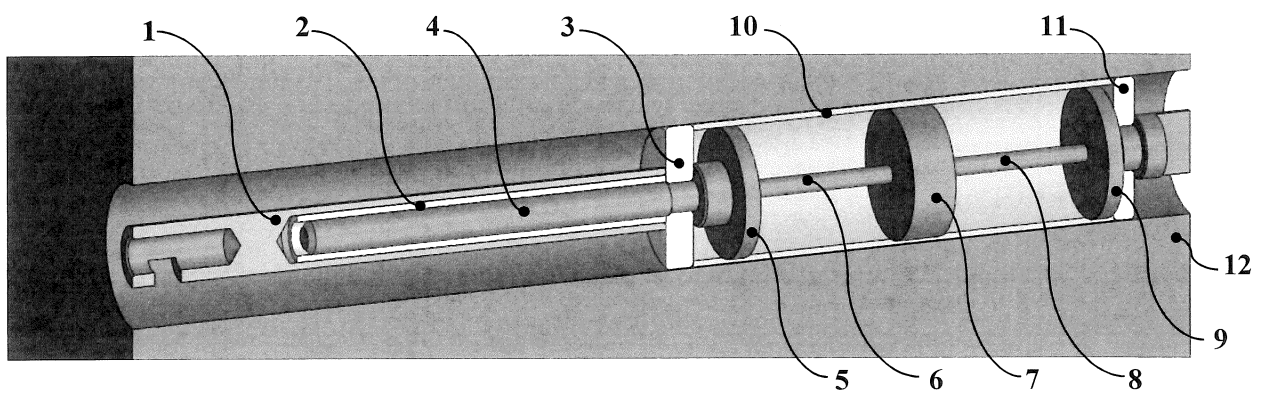
ống Teflon nhỏ (2) làm bằng vật liệu Teflon có tác dụng tạo thành lớp điện môi giữa thân phụ (1) và thanh trụ đồng (4);

vòng chặn (3) làm bằng vật liệu Teflon, trong đó vòng chặn này được lắp ở giữa thân phụ này và thân chính này; và

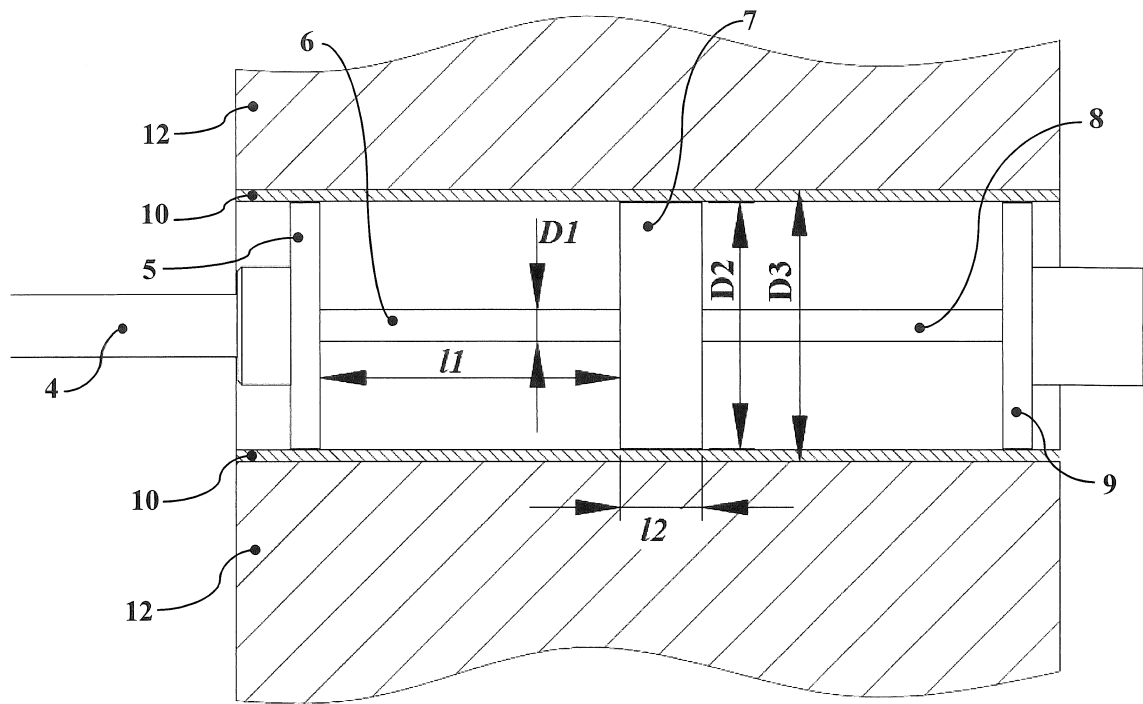
vòng chặn (11) làm bằng vật liệu Teflon, trong đó vòng chặn này dùng để cách ly đĩa đồng của thân chính với bên ngoài.



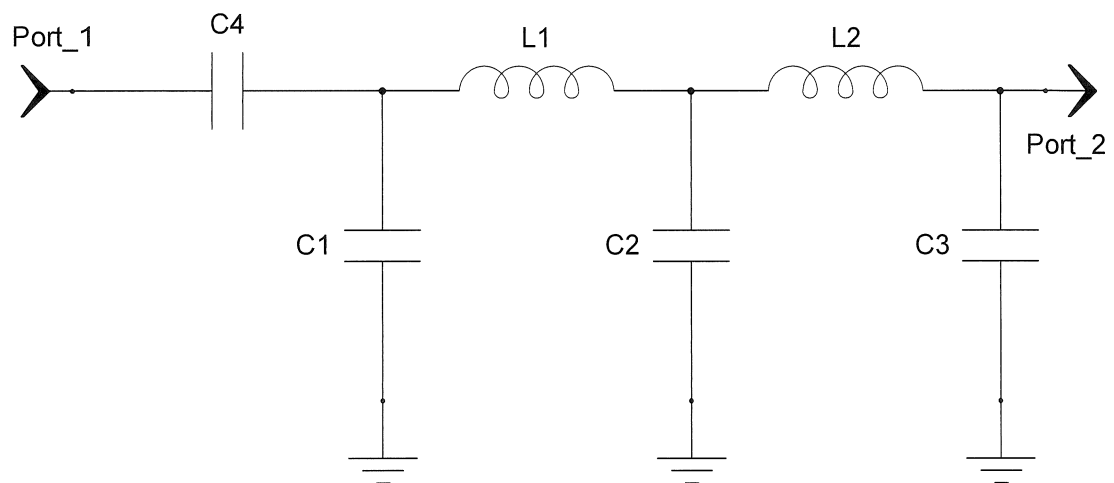
Hình 1



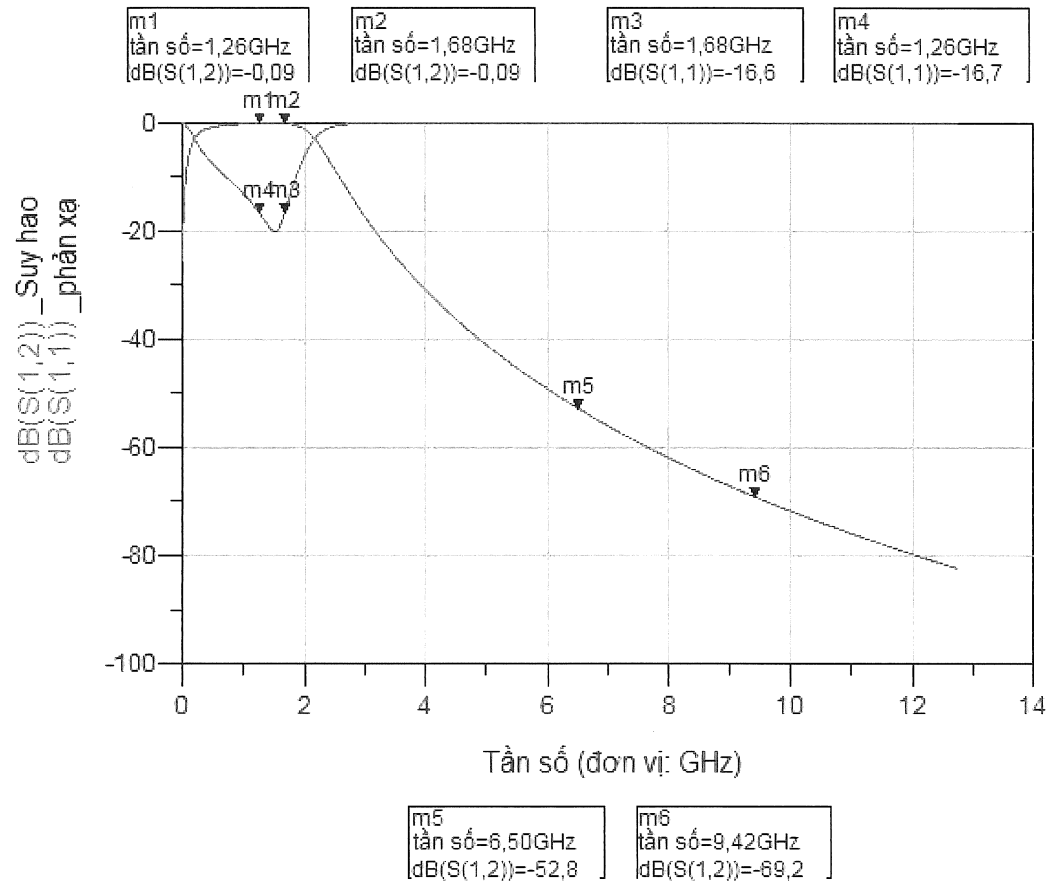
Hình 2



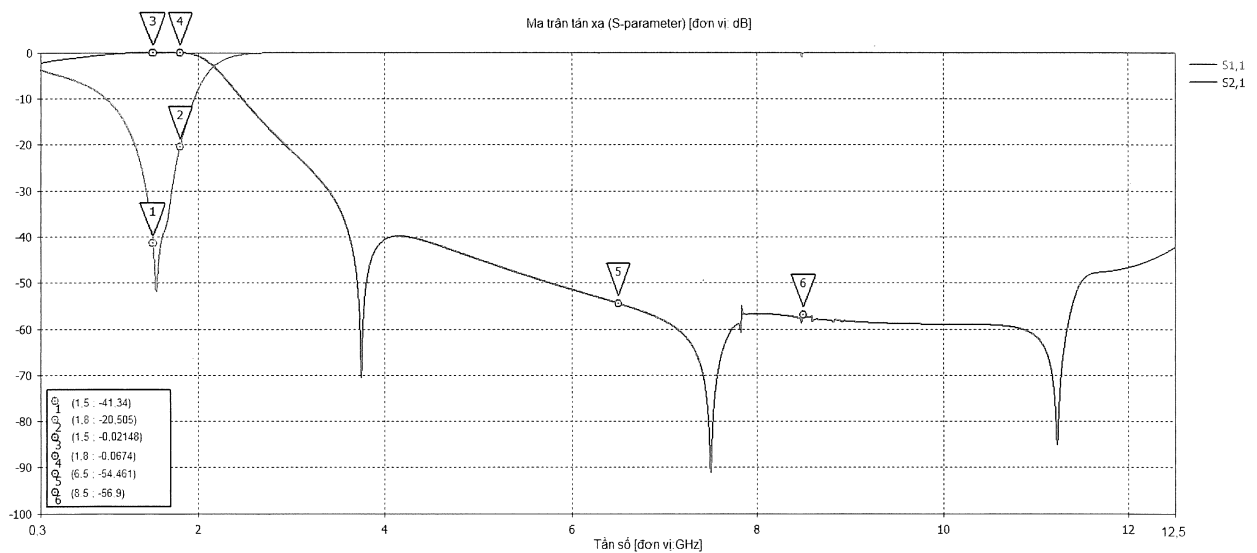
Hình 3



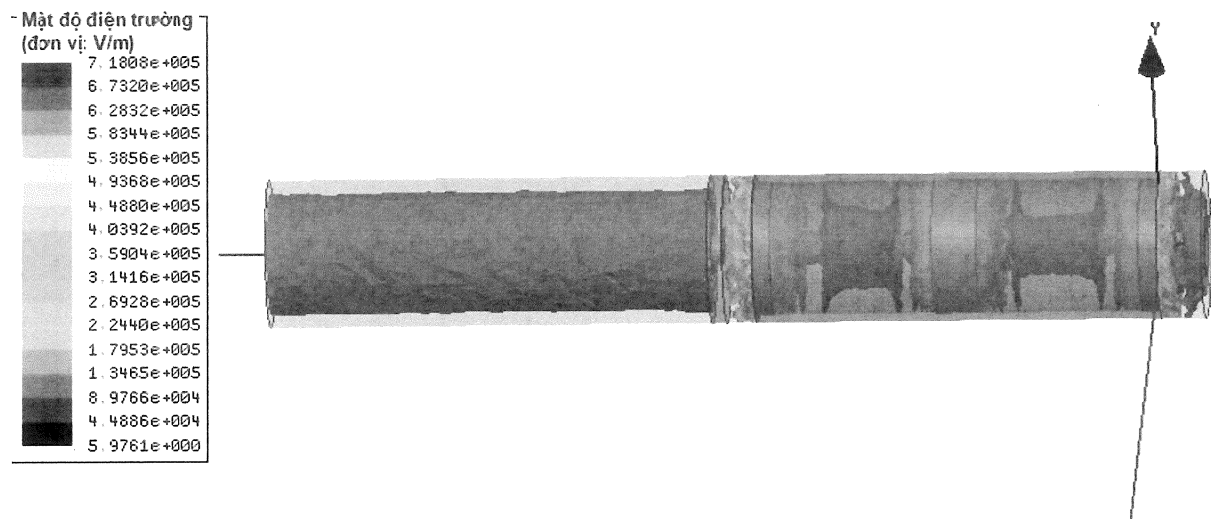
Hình 4



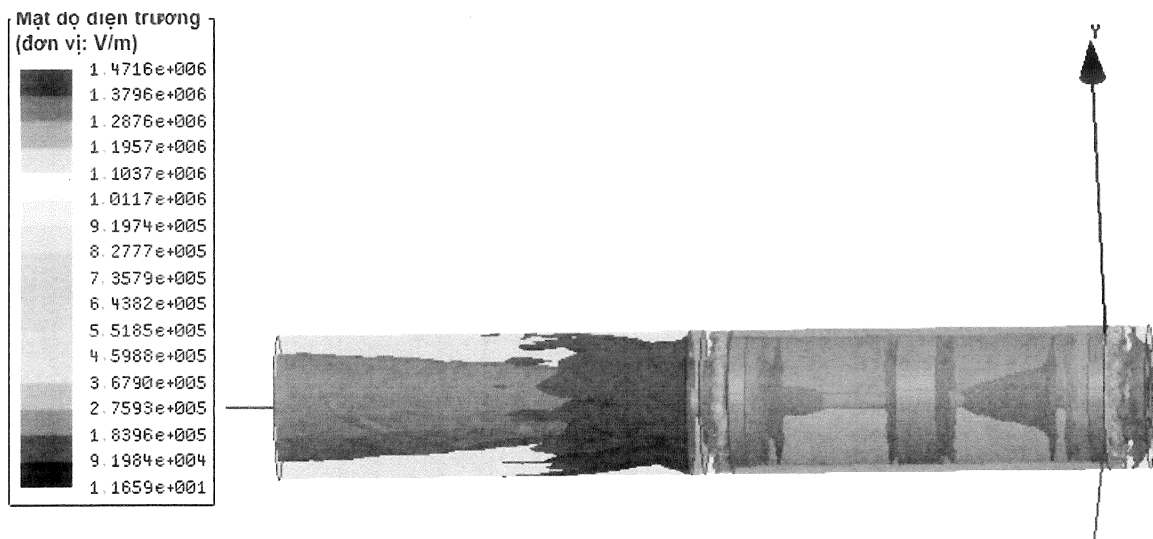
Hình 5



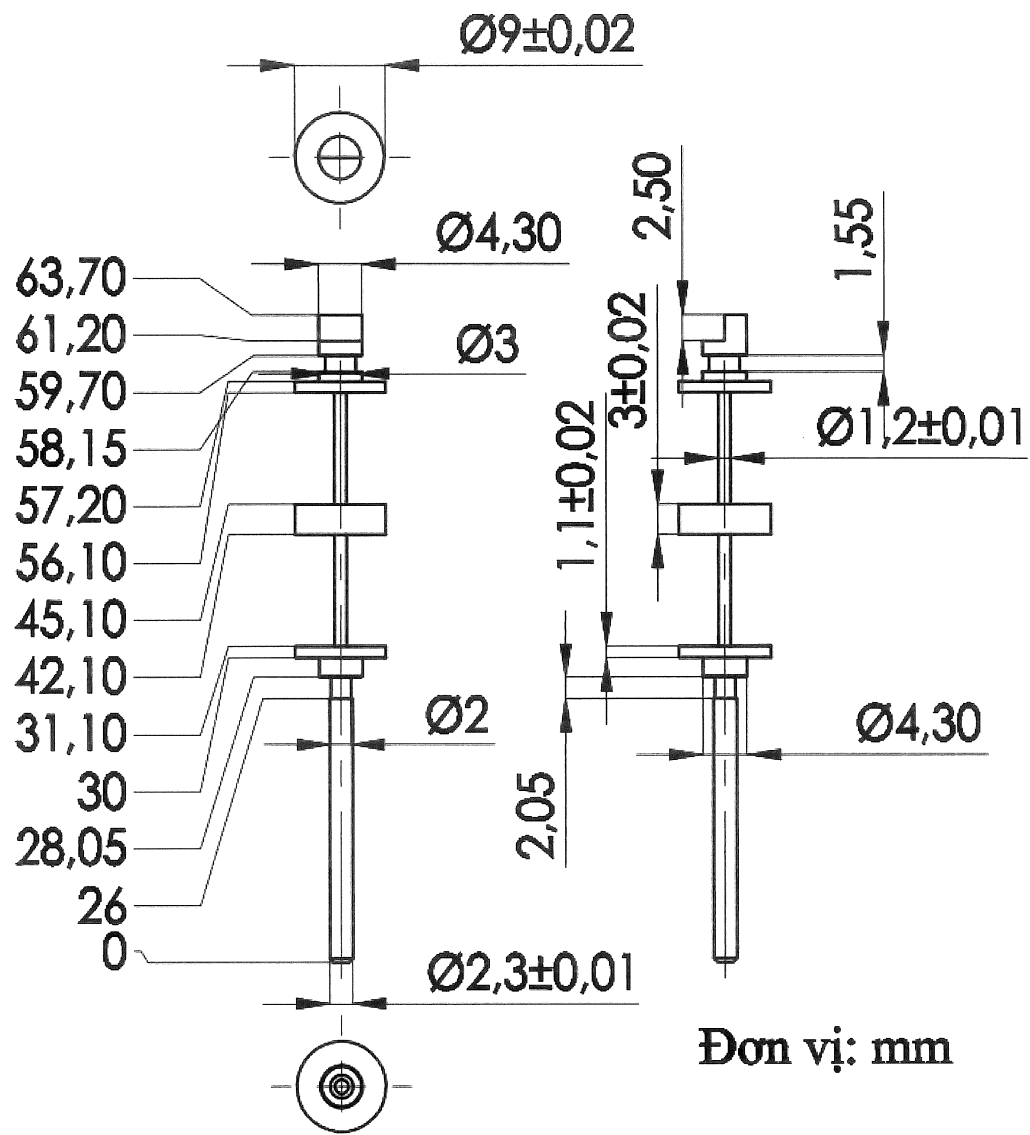
Hình 6



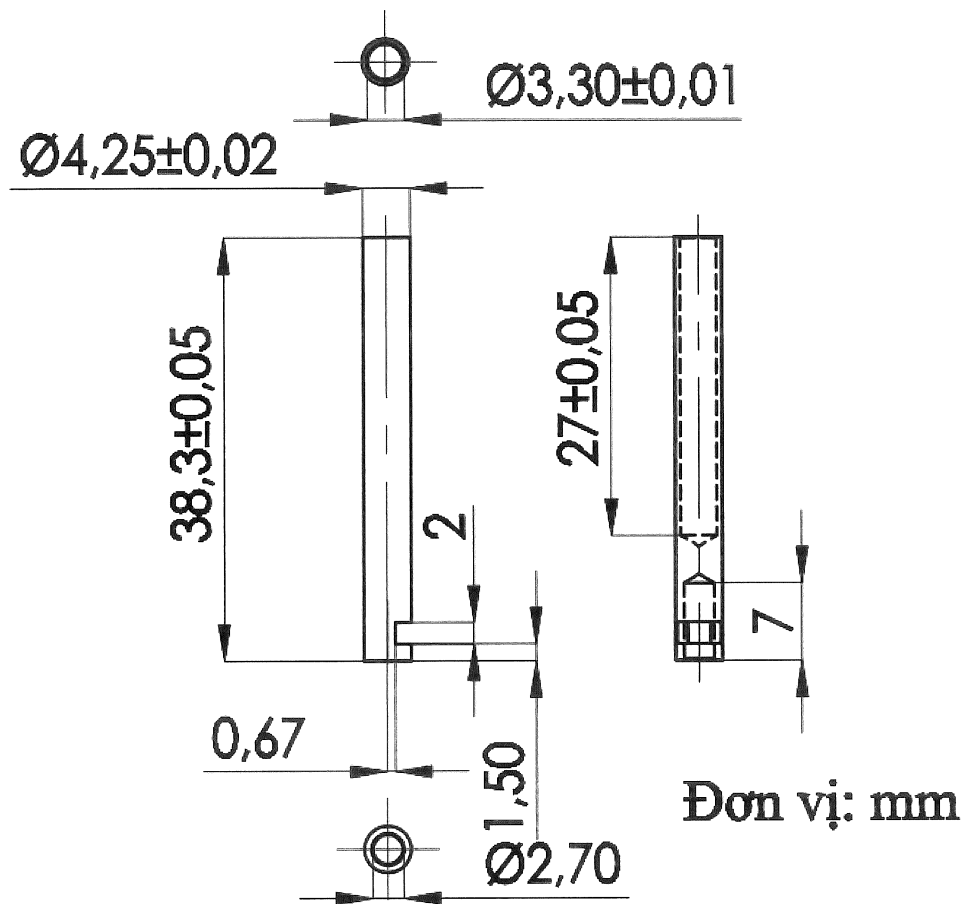
Hình 7



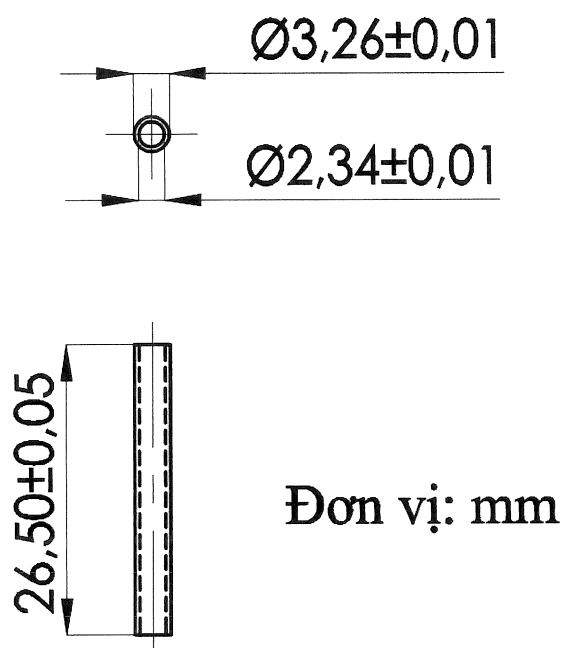
Hình 8



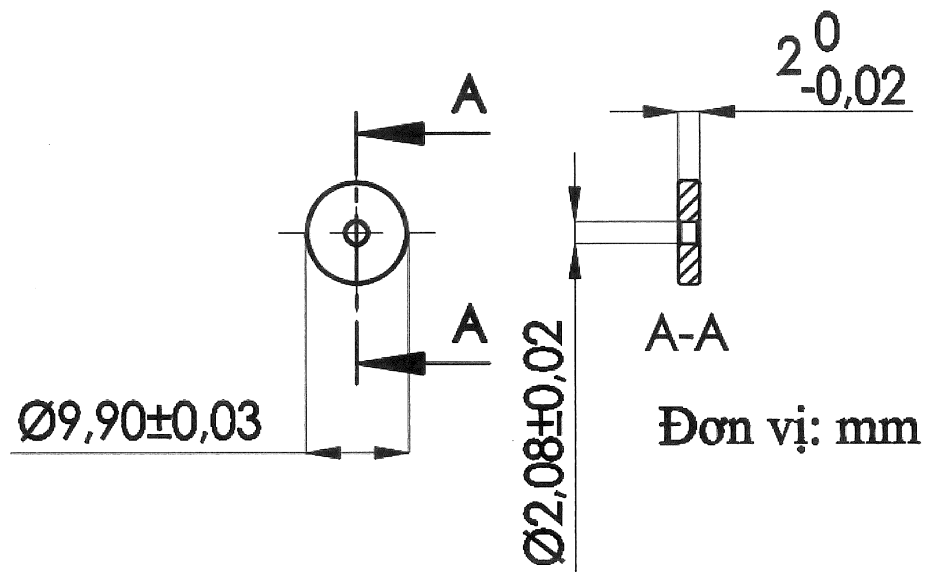
Hình 9



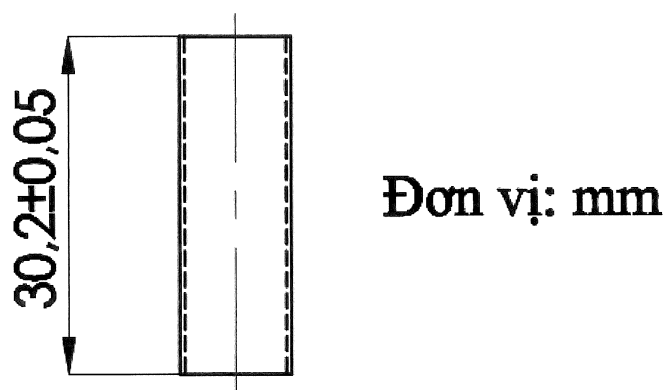
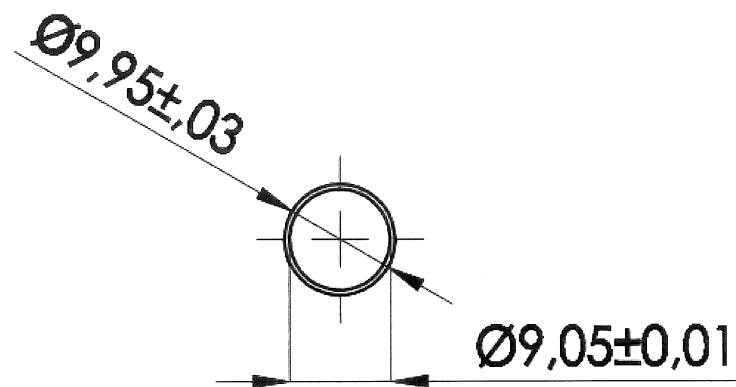
Hình 10



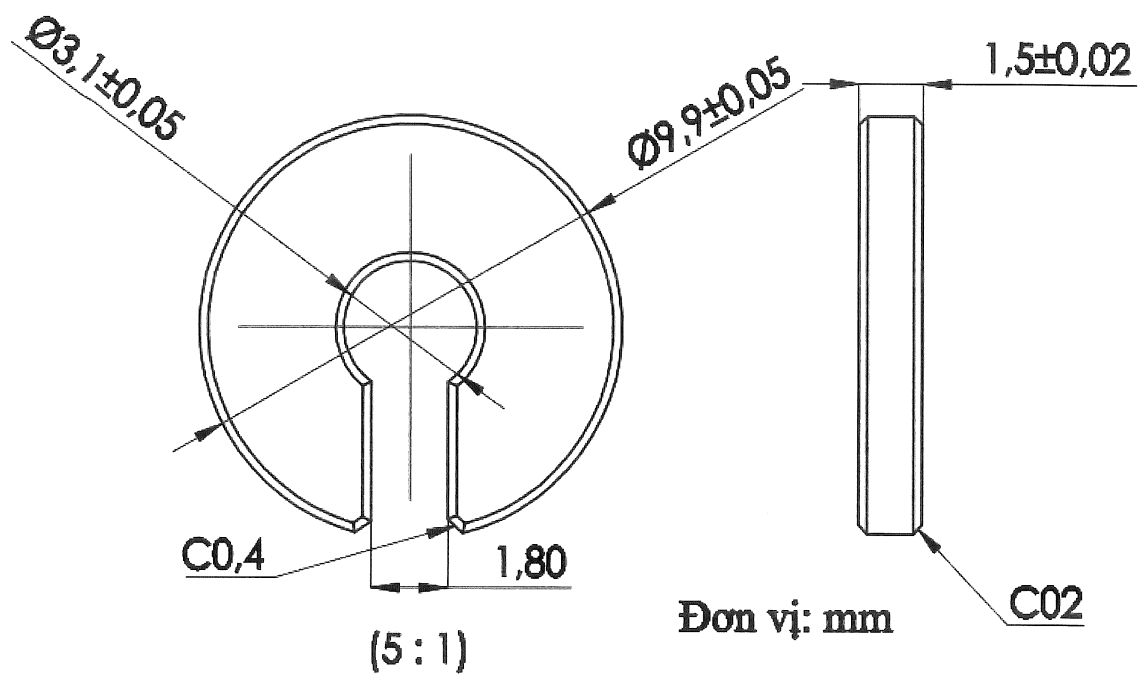
Hình 11



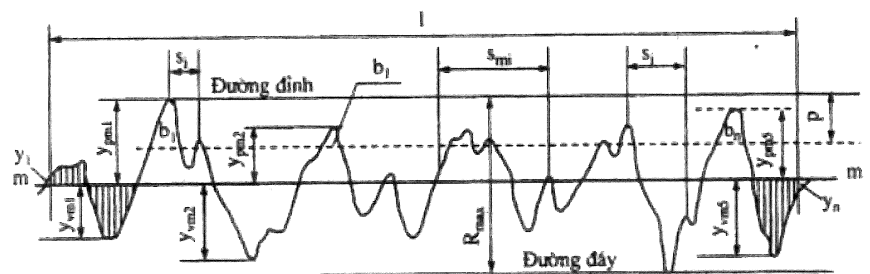
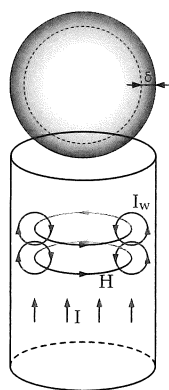
Hình 12



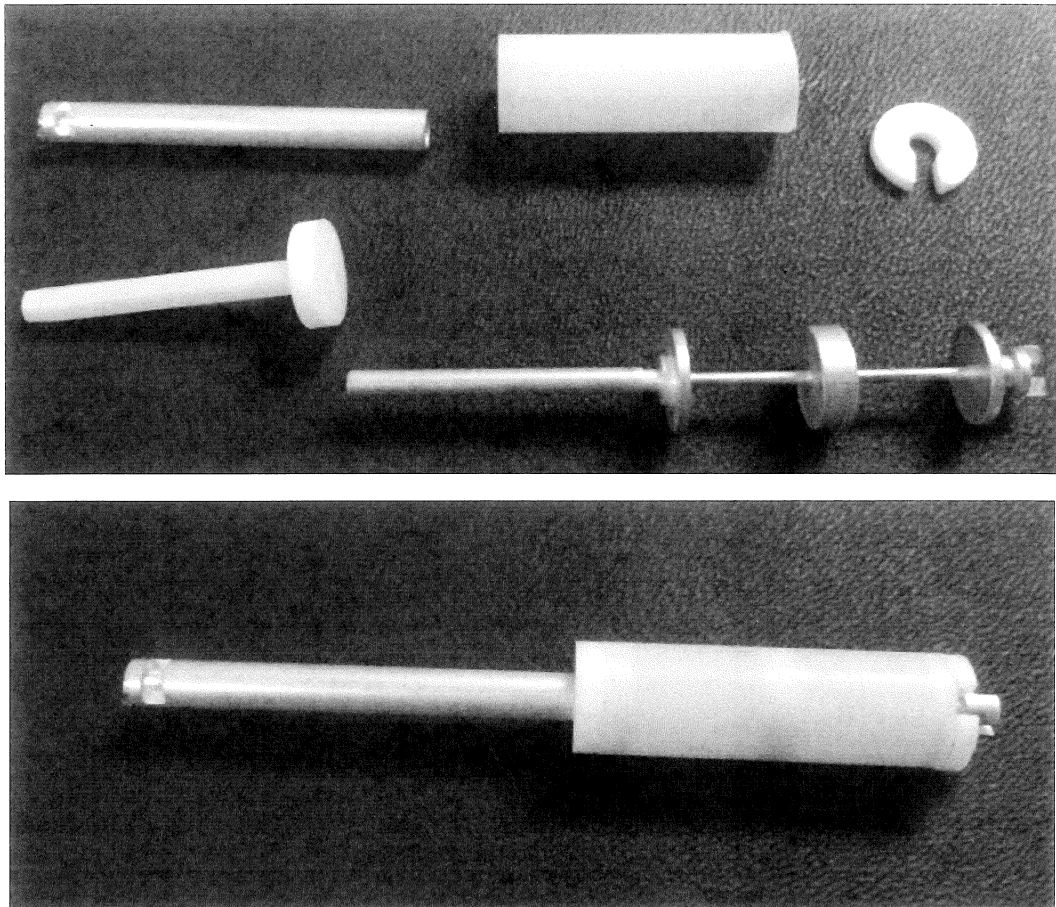
Hình 13



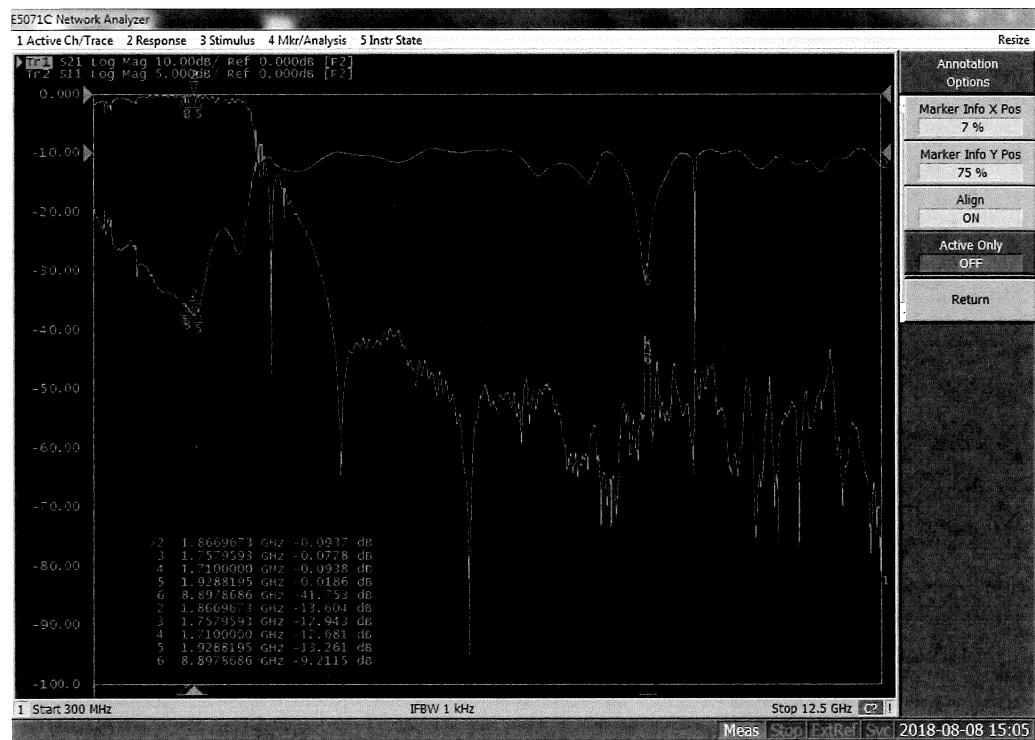
Hình 14



Hình 15



Hình 16



Hình 17