TÍNH TOÁN THAM SỐ CỦA NGUỒN PHÁT XẠ TẦN SỐ CAO GÂY HỎNG HÓC MẠCH ĐIỆN TỬ

Lê Duy Hiệu[1*], Bùi Công Phước[1], Trần Xuân Kiên[2]

Tóm tắt: *Mạch điện tử mà thành phần chính của nó là các linh kiện bán dẫn rời rạc hay mạch tích hợp (IC) có xu hướng liên tục thu nhỏ, điện áp cung cấp cho sự hoạt động của mạch thấp hơn. Nhiễu điện từ trường từ nguồn công suất đủ lớn, xâm nhập vào các thiết bị điện tử bán dẫn một cách cố ý hoặc không cố ý đều làm cho các mạch điện tử ở trạng thái hoạt động không đúng chức năng thiết kế hoặc thậm chí không hoạt động. Bài báo này đặt vấn đề tính toán độ lớn công suất nguồn phát tín hiệu tần số cao làm cho các mạch điện tử xảy ra hỏng hóc. Thực nghiệm sử dụng một nguồn phát bao gồm hệ thống ống dẫn sóng, đèn dao động (magnetron), một số phụ kiện khác và mạch điện tử được tích hợp các IC chế tạo theo công nghệ TTL/CMOS làm đối tượng thử nghiệm. Kết quả trong quá trình thực nghiệm xác định phạm vi mức công suất của nguồn phát tín hiệu tần số cao có thể làm ảnh hưởng đến sự hoạt động của thiết bị điện tử. Đồng thời bài báo cũng đề xuất những ứng dụng khác nhau dựa trên những ảnh hưởng này.*

Từ khóa: Năng lượng điện từ trường; Tần số cao; Phá hỏng mạch điện tử; Mạch tích hợp (IC).

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sự phát triển nhanh của công nghệ kỹ thuật số và bán dẫn đã cho phép sản xuất máy móc và thiết bị điện tử thu nhỏ, đa chức tính năng, tốc độ cao và sử dụng nguồn điện áp thấp cho hoạt động của mạch, dựa trên công nghệ chế tạo mạch phức tạp và tiên tiến [1-3]. Các thiết bị điện tử hiện đại đã được sử dụng rộng rãi trong gia đình, công nghiệp và quân sự. Tuy nhiên, thiết bị điện tử ngẫu nhiên hay cố ý nằm trong môi trường điện từ trường, nó có thể hoạt động không đúng chức năng hoặc không hoạt động. Sự hoạt động không đúng chức năng hoặc không hoạt động của các thiết bị điện tử có thể dẫn đến thương vong hay thảm họa kinh tế. Do đó, tính nhạy cảm của các thiết bị điện tử với môi trường điện từ công suất cao là vấn đề lớn được các nhà khoa học tập trung nghiên cứu [1-3]. Nội dung của bài báo tập trung xem xét tính nhạy cảm của các thiết bị điện tử với môi trường xung điện từ công suất cao, từ đó, tính toán mức công suất làm cho mạch điện tử xảy ra sự cố trong các phạm vi khác nhau.

Hỏng hóc của các thiết bị điện tử gây ra bởi nguy cơ tạo ra các tín hiệu nhiễu bên trong mạch điện tử do trường điện từ bên ngoài bức xạ vào. Trong môi trường xung điện từ, nó có thể xâm nhập vào các thiết bị điện tử một cách cố ý hoặc vô ý thông qua đầu vào, bộ phận ghép nối, dây dẫn kết nối,... Trên mạch điện tử, điện áp của nhiễu điện từ và dòng điện làm cho bản thân mạch điện tử hoạt động đúng chức năng kết hợp với nhau có thể gây ra sự cố hoặc phá hủy các thiết bị điện tử. Như vậy, bức xạ điện từ có thể gây ra hư hỏng vĩnh viễn cho các thiết bị bán dẫn. Đối với những trường hợp như vậy, việc phân tích môi trường điện từ là cần thiết. Mục tiêu của bài báo này tính toán mức công suất ảnh hưởng tới các thiết bị sử dụng vi mạch kỹ thuật số (IC họ TTL/CMOS) khi có sóng điện từ công suất cao tác động. Bài báo có cấu trúc gồm 4 phần, trong phần 2 trình bày đặc trưng cơ bản của các nguồn xung điện từ trường (EMP), ảnh hưởng của EMP công suất cao tới các mạch điện tử, thí nghiệm xác định tham số cường độ điện trường, phần 3 trình bày các bước tính toán giá trị công suất nguồn phát tín hiệu tần số cao với những điều kiện nhất định và các nhận xét kết quả tính toán, kết luận và đề xuất các lĩnh vực ứng dụng được trình bày trong phần 4.

2. NGUỒN XUNG ĐIỆN TỪ TRƯỜNG CÔNG SUẤT CAO

2.1. Đặc trưng của nguồn xung điện từ công suất cao

Theo [1, 2] đã có cơ sở khẳng định rằng EMP với cường độ đủ mạnh trong dải tần từ 200

MHz đến 5 GHz có thể gây ra sự cố hoặc phá hủy các mạch điện tử. Điều gây ra sự cố hoặc phá hủy trong mạch điện tử thường được gọi là bức xạ điện từ có chủ ý hoặc không chủ ý. Tín hiệu EMP sử dụng trong nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm là một xung hình "chữ nhật", "vuông" hoặc liên tục.

EMP được đặc trưng bởi:

- Dạng năng lượng;
- Dải tần số hoặc phổ;
- Dạng sóng: hình dạng, thời gian tồn tại (độ rộng xung) và biên độ.

2.2. Hiệu ứng của HPM đối với một hệ thống điện tử

EMP với cường độ đủ mạnh làm cho mạch điện tử hoạt động không đúng chức năng vốn có của nó được gọi là HPM. Hiệu ứng của HPM đối với mạch điện tử là một hiện tượng rất phức tạp. Một nguồn năng lượng định hướng phát ra tín hiệu HPM, xuyên qua vỏ bảo vệ và kích thích hoạt động của mạch bên trong. Kích thích HPM tạo ra các hiệu ứng có khả năng gây ra sự cố hệ thống hoặc gây ra thiệt hại vật lý cho mạch.

Trạng thái của mạch điện tử khi bị ảnh hưởng của HPM thường được phân loại theo mức độ ảnh hưởng của chúng, bao gồm:

"Không nhận biết" - Trạng thái *"Không nhận biết"* gây ra bởi các tín hiệu HPM làm gián đoạn chức năng của mạch điện tử (mạch) trong thời gian tồn tại HPM mà không gây ra bất kỳ thiệt hại lâu dài nào cho mạch. Mạch bị ảnh hưởng sẽ trở lại hoạt động bình thường sau khi mất tín hiệu HPM. Trạng thái này còn được gọi là "gây nhiễu".

"Mất chức năng" - Trạng thái *"Mất chức năng"* của mạch gây ra bởi tín hiệu HPM nhưng ít hoặc không gây thiệt hại cho mạch, chỉ các phần tử trên mạch bị ảnh hưởng. Tuy nhiên, trạng thái này vẫn còn sau khi HPM kết thúc. Mạch phải được khởi động lại để hoạt động bình thường (HPM khiến hệ thống máy tính bị treo, cần phải khởi động lại).

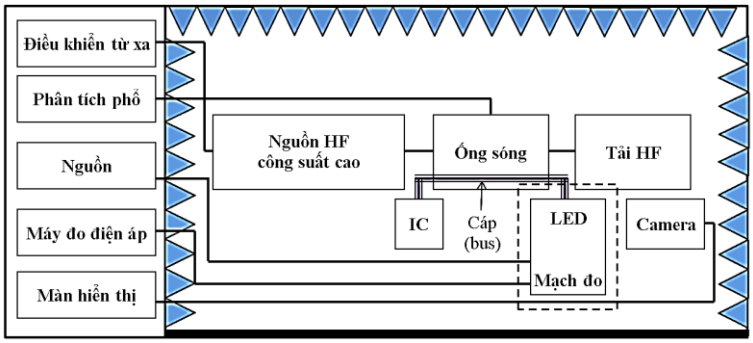
"Hỏng hóc" - Trạng thái *"Hỏng hóc"* của mạch gây ra bởi tín hiệu HPM, dẫn đến phá vỡ cấu trúc vật lý của các vật liệu tạo nên IC họ TTL/CMOS của mạch. Nó bao gồm đánh thủng mặt ghép hỗ dẫn của bán dẫn, thay đổi trở kháng do hiệu ứng nhiệt,... Về tổng thể mạch cần được thay thế một số phần tử cụ thể để mạch lại hoạt động bình thường.

"Phá hủy" - Trạng thái *" Phá hủy"* của mạch gây ra bởi tín hiệu HPM, là sự cố nghiêm trọng nhất mà HPM có thể gây ra cho mạch điện tử. Sự phá hủy xảy ra khi bức xạ năng lượng điện từ trường công suất cao vào mạch điện tử và khiến nhiều thành phần của mạch bị phá hủy không thể khắc phục được. Mức độ phá hủy gây ra đòi hỏi phải thay thế toàn bộ mạch.

2.3. Xác định tham số trường điện từ ảnh hưởng đến một hệ thống điện tử

2.3.1. Thí nghiệm xác định tham số trường điện từ

Kết quả của các công trình [1-3] đưa ra mô hình thực nghiệm sự ảnh hưởng của HPM đối với IC.



Hình 1. *Mô hình thực nghiệm sự ảnh hưởng của HPM đối với IC.*

Để xác định tham số trường điện từ gây ra "sự phá hủy" và "sự cố" của IC người ta sử dụng một Buồng hấp thụ, bên trong nó lắp đặt: Máy phát tín hiệu tần số cao có công suất có thể điều chỉnh từ (0÷3) kW, tần số trong khoảng (2,4÷2,5) GHz (magnetron); Bộ ống sóng; Tải hấp thụ; Mạch điện tử lắp ráp IC họ TTL/CMOS kết nối với Mạch quan sát trạng thái (LED) và Mạch có điện trở ngắn mạch thông qua Cáp tín hiệu điện không bọc kim dạng Bus, bộ phận này gọi là đối tượng thí nghiệm. Đối tượng này được bố trí gần với bộ ống sóng; quan sát trạng thái bên trong của mạch khi magnetron hoạt động dùng Camera chuyên dụng. Bên ngoài Buồng hấp thụ kết nối các thiết bị: Điều khiển từ xa để điều chỉnh mức công suất ra của nguồn tần số cao, Máy phân tích phổ để xác định công suất và tần số của nguồn phát, Nguồn điện cung cấp nguồn cho mạch LED và mạch đo đồng thời sẽ cho biết mạch hoạt động đúng hay không đúng với chức năng đã thiết kế, Thiết bị đo đạc tham số điện, máy đo điện áp sẽ ghi lại các giá trị tương ứng, và bộ phận Hiển thị giám sát kết nối với camera chuyên dụng sẽ quan sát được trạng thái của mạch. Thống kê các kết quả được thể hiện ở biểu đồ hình 2 và bảng 1.

IC dùng cho thí nghiệm là các IC chế tạo theo các công nghệ sau:

- Transistor lưỡng cực dòng Schottky công suất thấp, điện áp hoạt động 5V (kí hiệu TTL -LS-);

- Transistor lưỡng cực dòng Schottky công suất chuyển mạch nhanh, điện áp hoạt động 5V (kí hiệu TTL -F-);

- Transistor hiệu ứng trường kim loại - oxit bán dẫn dòng tốc độ làm việc cao, điện áp hoạt động từ 5V đến 15V (kí hiệu CMOS -HC-);

- Transistor hiệu ứng trường kim loại - oxit bán dẫn dòng tốc độ làm việc cao có chống nhiễu, điện áp hoạt động từ 5V đến 15V (kí hiệu CMOS -HCT-).

2.3.2. Kết quả thí nghiệm

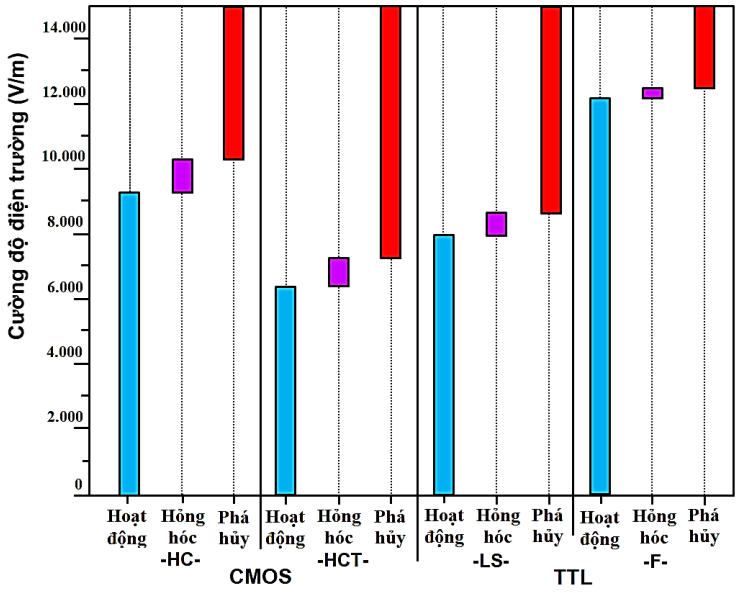
Trong quá trình thực nghiệm, quan sát hai trạng thái "Hỏng hóc" và "Phá hủy" của mạch. Xác định các tham số:

- Ngưỡng cường độ điện trường xảy ra "Hỏng hóc" của IC (NHH);

- Dải cường độ điện trường xảy ra "Hỏng hóc" của IC (DHH);

- Ngưỡng cường độ điện trường xảy ra "phá hủy" IC (NPH);

- Dải cường độ điện trường xảy ra "phá hủy" IC như bị cháy, nổ,… (DPH).



Hình 2. *Biểu đồ hỏng hóc và phá hủy của CMOS/TTL.*

Trên cơ sở biểu đồ ở hình 2, chúng ta xây dựng được bảng tham số cường độ điện trường:

Bảng 1. *Giá trị cường độ điện trường gây "hỏng hóc" và "phá hủy" cho IC.*

	CMOS -HC-	CMOS -HCT-	TTL -LS-	TTL -F-
NHH (kV/m)	>9,3	>6,4	>8	>12,2
DHH (kV/m)	9,3 - 10,3	6,4 - 7,2	8,0 – 8,6	12,2 – 12,5
NPH (kV/m)	10,3	7,2	8,6	12,5
DPH (kV/m)	≥10,3	≥7,2	≥8,6	≥12,5

Giá trị cường độ điện trường gây ra các dạng sự cố của mạch điện tử trên là cơ sở tính toán công suất nguồn phát xạ gây hư hỏng mạch điện tử trong thực tế. Theo bảng tham số trên, giá trị cường độ điện trường để tính toán công suất nguồn phát xạ lấy giá trị 12,5 kV/m.

3. TÍNH TOÁN CÔNG SUẤT VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô tả bài toán

Sóng truyền trong không gian tự do (đồng nhất, đẳng hướng, không hấp thụ); Nguồn phát xạ là đẳng hướng, anten có góc mở 15^0 và hệ số khuếch đại 20 dB; Mật độ dòng công suất trên đơn vị diện tích vuông góc với hướng lan truyền là không đổi trên diện tích mặt cắt của góc mở của anten trên; Mạch điện tử sử dụng công nghệ TTL/COMS đặt cách anten nguồn phát xạ một khoảng cách r; Chúng ta cần tính toán mức công suất tương ứng của nguồn phát xạ để mạch điện tử xảy ra các trạng thái hỏng hóc.

3.2. Môi trường truyền sóng

Môi trường truyền sóng là môi trường đồng nhất, đẳng hướng và không hấp thụ, sóng vô tuyến điện khi truyền lan từ điểm phát đến điểm thu sẽ đi theo đường thẳng. Trong thực tế với lớp khí quyển quả đất chỉ trong những điều kiện nhất định, khi tính toán cũng có thể coi như môi trường chân không.

3.2.1. Tác động của môi trường truyền sóng

- Làm suy giảm biên độ sóng;
- Làm méo dạng tín hiệu tương tự;
- Gây lỗi đối với tín hiệu số do nhiễu.

3.2.2. Nguyên nhân suy giảm cường độ điện trường

- Sự phân tán năng lượng bức xạ khi lan truyền (suy hao khoảng cách);
- Sự hấp thụ của môi trường (tổn hao nhiệt);
- Sự nhiễu xạ sóng (tán xạ);
- Sự tán sắc.

3.3. Tính toán công suất

Mạch điện tử chịu sự ảnh hưởng của HPM ở bốn trạng thái: "Không nhận biết"; "Mất chức năng"; "Hỏng hóc" và "Phá hủy". Trong phần tính toán công suất nguồn phát, bài báo giới hạn tính cho trạng thái "Phá hủy" mạch điện tử.

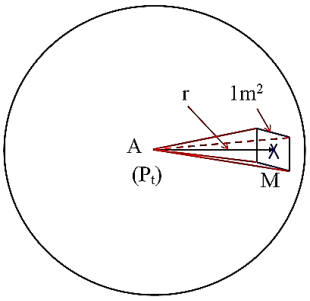
3.3.1. Mật độ thông lượng công suất, cường độ điện trường

Giả thiết có một nguồn bức xạ vô hướng (đẳng hướng) có công suất phát P_t(W) đặt tại điểm A trong môi trường không gian tự do là môi trường đồng nhất đẳng hướng và không hấp thụ, có hệ số điện môi tương đối $\varepsilon' = 1$. Xét trường tại một điểm M cách A một khoảng r (m).

Vì nguồn bức xạ là vô hướng, môi trường đồng nhất và đẳng hướng nên năng lượng sóng điện từ do nguồn bức xạ sẽ tỏa đều ra không gian thành hình cầu. Như vậy, mật độ công suất ở điểm M cách nguồn phát xạ một khoảng r sẽ được xác định bằng công thức sau:

$$S_i = \frac{P_T}{4\pi r^2}\left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (1)$$

Trong đó: Si là mật độ công suất tại điểm M; P_t là công suất nguồn bức xạ.



Hình 3. *Bức xạ của nguồn bức xạ vô hướng trong không gian tự do.*

Theo lý thuyết trường điện từ, ta có:

$$S_i = E_h H_h \left(\frac{W}{m^2}\right) \quad (2)$$

$$H_h = \frac{E_h}{120\pi}\left(\frac{A}{m}\right) \quad (3)$$

Trong đó: E_h(V/m), H_h(A/m) là giá trị hiệu dụng của cường độ điện trường và từ trường; 120π là trở kháng sóng của không gian tự do (Ω)

Thay công thức (3) vào (2), ta được:

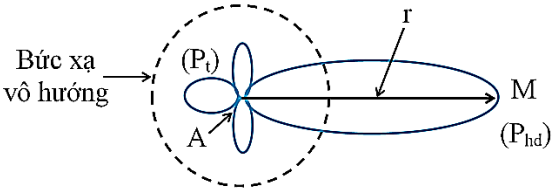
$$S_i = \frac{E_h^2}{120\pi}(W/m^2) \quad (4)$$

So sánh công thức (1) và (4), ta có:

$$E_h = \sqrt{\frac{30P_T}{r^2}}(V/m) \quad (5)$$

Nhận xét: Cường độ điện trường của sóng vô tuyến điện truyền lan trong môi trường đồng nhất đẳng hướng và không hấp thụ tỷ lệ thuận với căn hai công suất bức xạ và tỷ lệ nghịch với khoảng cách. Khi khoảng cách tăng thì cường độ điện trường giảm vì năng lượng sóng toả rộng ra không gian, còn gọi là sự khuếch tán tất yếu của sóng. Để hạn chế sự khuếch tán này người ta sử dụng các bộ bức xạ có năng lượng tập trung về hướng cần thông tin để làm tăng cường độ điện trường lên. Để làm được điều này chúng ta sử dụng các anten có hướng, với hệ số hướng tính D hoặc hệ số khuếch đại G.

Nếu nguồn bức xạ có hướng, lúc đó năng lượng của sóng vô tuyến điện sẽ được tập trung về hướng điểm M được biểu thị bằng hệ số hướng hay hệ số khuếch đại như chỉ ra trên hình 4.



Hình 4. *Nguồn bức xạ có hướng.*

Trong trường hợp này, mật độ công suất được xác định theo công thức:

$$S_i = \frac{P_{hd}G_t}{4\pi r^2}(W/m^2) \quad (6)$$

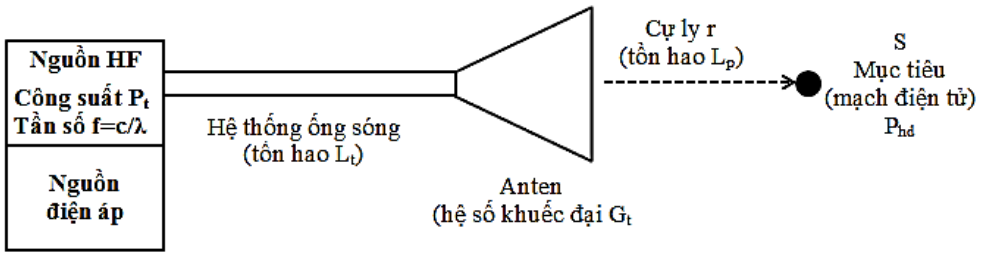
Trong đó: P_{hd} là công suất hiệu dụng (công suất gây hỏng mạch điện tử).

Khi đó, cường độ điện trường sẽ được tính theo công thức (cự ly r (m), công suất phát Pt(W)):

$$E_h = \frac{\sqrt{30 P_{hd} G_t}}{r} (V/m) \quad (7)$$

3.3.2. Mô hình tính toán trong thực tế

Cấu trúc nguồn phát xạ được thể hiện trên hình 5:



Hình 5. *Cấu trúc nguồn bức xạ điện từ.*

P_t: công suất nguồn phát xạ cần tính; Hệ thống ống sóng truyền năng lượng siêu cao tần từ máy phát tới anten có hệ số tổn hao L_t; Anten kiểu loa, góc mở 15^0 và hệ số khuếch đại G_t; Mạch điện tử đặt tại vị trí S cách mặt mở của anten một khoảng r; năng lượng siêu cao tần truyền từ anten tới mạch điện tử bị tổn hao một hệ số L_p.

3.3.3. Các bước tính toán

Theo hình 5, Công suất bức xạ đẳng hướng hiệu dụng tại vị trí S được tính:

$$P_{hd}\ (dBm) = P_t \times G_t / L_t$$

$$P_{hd}(dBW) = P_t\ (dBW) + G_t\ (dBi) - L_t\ (dB)$$

Theo các giả thiết đã nói ở trên:

$$P_{hd}(dBW) = P_t\ (dBW) + 20 - 2$$

$$P_{hd}(dBW) = P_t\ (dBW) + 18$$

Biến đổi (7), với G_t = 20 dBi và E_{hmax} = 12,5 kV/m:

$$P_{hd}[W] = \frac{\left(E_h\left[\frac{V}{m}\right] * r[m]\right)^2}{30 * 10^{(G_t[dBi]/10)}} \quad (8)$$

Thay r bằng các giá trị khác nhau, sau khi tính được các giá trị P_{hd} đổi ra dBW, ta sẽ tính được các giá trị của P_t tương ứng, và có bảng sau:

Bảng 2. *Giá trị công suất nguồn phát "phá hủy" IC.*

r (m)	1	5	10	15	30	50	1000
Pt (kW)	0,832	20,650	82,600	185,780	743,020	2.065,38	826.040

Nhận xét:

- Giá trị cường độ điện trường sử dụng để tính là 12,5 kV/m, giá trị này gây "phá hủy" mạch điện tử (bảng 1), như vậy, với công suất nguồn phát xạ như trên và sử dụng anten định hướng có hệ số khuếch đại 20 dBi, khi mạch điện tử đặt trong phạm vi r tương ứng (bảng 2), nó sẽ bị phá hủy.

- Có thể sử dụng vật liệu chế tạo anten có hệ số hướng cao mà không làm suy giảm công dụng của nó thì công suất nguồn phát giảm đi đáng kể.

- Giá trị công suất tín hiệu tần số cao đã tính được phù hợp với giá trị công suất của các bộ dao động tần số cao mà các hãng trên thế giới đã chế tạo được.

4. KẾT LUẬN

Dựa trên kết quả nghiên cứu đã được công bố, chúng ta thấy HPM làm cho mạch điện xảy ra các trạng thái: "Không nhận biết", "Mất chức năng", "Hỏng hóc" và "Phá hủy". Bài báo cũng đã thống kê được giá trị cường độ điện trường làm cho mạch điện tử "Hỏng hóc" và "Phá hủy".

Đã tính toán được giá trị công suất của nguồn phát tại một số khoảng cách (giữa nguồn phát và mạch điện tử) khác nhau, mà tại các khoảng cách đó mạch điện tử bị "Phá hủy". Điều này mở ra những ứng dụng của HPM trong các lĩnh vực trật tự xã hội và quốc phòng an ninh. Ví dụ như chế tạo thiết bị vũ khí điện trường định hướng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Nicholas A. Estep, *"High Power Microwave (HPM) and Ionizing Radiation Effects on CMOS Devices,"* Thesesand Dissertations (2009), tr. 6-25.

[2]. Michael A. Holloway, *"Characterization and Modeling of High Power Microwave Effects in CMOS Microelectronics,"* University of Maryland, College Park, Department of Electrical and Computer Engineering (2010), pp. 3-18.

[3]. Dr. John Rodgers, *"Protection of Electronic Systems from the Effects of High-Power Microwave (HPM) and Ultra-Wideband (UWB) Sources,"* University of Maryland, Institute for Research in Electronics and Applied PhysicsEnergy Research Facility (2012), tr. 2-12.

ABSTRACT

EVALUATING THE EFFECTS OF HIGH FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION TO ELECTRONIC DEVICES

Electronic circuits whose main components are discrete semiconductor devices or integrated circuits (ICs) tend to grow smaller. As such, the voltage provided for the operation of the circuit is becoming lower. The electromagnetic interferences from the power source typically are significant enough to intentionally or unintentionally penetrate semiconductor electronic devices, causing degradation and sometimes event failures in electronic circuits. This paper studies the power limits of high frequency (HF) signal sources to prevent failures in electronics circuits. Experiments are done in a transmitter power supply, consisting of a waveguide system, an oscillator (magnetron), some other accessories, and an electronic circuit integrated with ICs made by TTL/CMOS technology as test objects. The results during the experiment can help determine the power level limit that can affect the electronic equipment's operation. We also propose several applications that can apply in practical systems based on these findings.

Keywords: High Power electromagnetics - HPEM; The particular field; Interesting subject.

Nhận bài ngày 30 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 30 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: [1]Viện Ra đa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;
[2]Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.
*Email: leduyhieu73vrd@gmail.com.