

Một cấu trúc mới của bộ khuếch đại VGA công nghệ CMOS

Trần Đình Lâm*, Lê Kỳ Biên, Nguyễn Mạnh Cường

Viện Điện tử, Viện KH&CN Quân sự, Bộ Quốc phòng

Ngày nhận bài 31.3.2015, ngày chuyển phản biện 6.4.2015, ngày nhận phản biện 27.4.2015, ngày chấp nhận đăng 4.5.2015

Nghiên cứu này đề xuất một cấu trúc cho bộ khuếch đại có hệ số khuếch đại có thể biến đổi (Variable gain amplifiers - VGA) sử dụng công nghệ CMOS 0,35 μm . Nhằm tăng tính chống nhiễu và tính tuyến tính, bộ VGA được thiết kế dựa trên cấu hình bộ khuếch đại vi sai (KĐVS). Hệ số khuếch đại được thay đổi theo hàm mũ giả dựa trên biến đổi nguồn dòng cung cấp cho một cặp vi sai tải mắc theo kiểu diode-connected. Các kết quả mô phỏng cho thấy, hệ số khuếch đại có thể thay đổi liên tục và tuyến tính từ 8 dB đến 21 dB khi điện áp điều khiển thay đổi từ 1,4 V đến 3,8 V, băng thông của bộ VGA đề xuất là lớn hơn 250 MHz.

Từ khóa: bộ khuếch đại có hệ số khuếch đại có thể biến đổi (VGA), bộ KĐVS, công nghệ CMOS, hệ số khuếch đại theo hàm mũ.

Chỉ số phân loại 1.2

A NEW STRUCTURE OF THE VARIABLE GAIN AMPLIFIER USING CMOS TECHNOLOGY

Summary

This paper proposes a solution for a variable gain amplifier (VGA) using 0.35 μm CMOS technology. In order to increase linearity and noise performance, the VGA has been designed based on the configuration of differential amplifier. The gain is altered under a pseudo-exponential function following the control of a current source supplied to a source-coupled differential pair with diode-connected load. The simulation results indicate that the gain is varied continuously and linearly in a range from 8 dB to 21 dB when the controlled voltage varies from 1.4 V to 3.8 V, and the bandwidth of the VGA is proposed higher than 250 MHz.

Keywords: CMOS, differential amplifier, exponential gain, VGA.

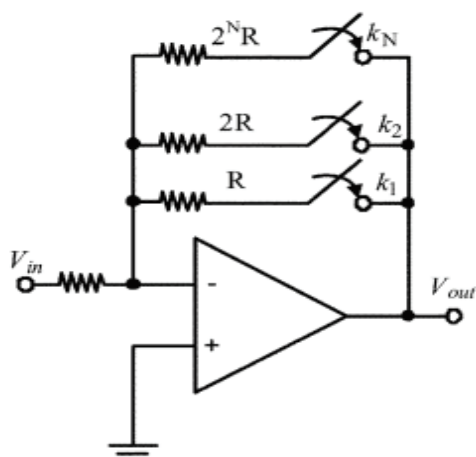
Classification number 1.2

Đặt vấn đề

Bộ khuếch đại có hệ số khuếch đại biến đổi VGA được ứng dụng rộng rãi trong các hệ thống xử lý tín hiệu, đặc biệt trong lĩnh vực thông tin vô tuyến. Để nâng cao tính năng của VGA nhằm đáp ứng cho các ứng dụng đòi hỏi điều khiển hệ số khuếch đại với độ chính xác và độ tuyến tính cao, cũng như giảm giá thành sản xuất, các bộ VGA thường được thực thi trên công nghệ bán dẫn Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) với mức độ tích hợp ngày càng cao [1].

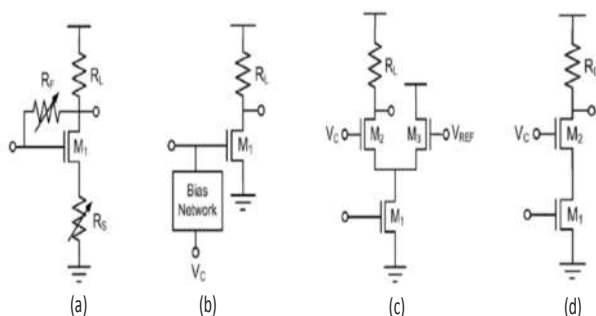
Trong công nghệ CMOS, nhìn chung có hai phương pháp chính được sử dụng để điều chỉnh hệ số khuếch đại, phân loại theo tín hiệu điều khiển là rời rạc hay liên tục [2]. Các bộ VGA với tín hiệu điều khiển số sử dụng một chuỗi các điện trở hoặc tụ điện chuyển mạch để thay đổi hệ số khuếch đại, như trình bày trong hình 1. Với phương pháp này, hệ số khuếch đại được biến đổi một cách rời rạc theo tín hiệu điều khiển số (là các chuỗi bit đầu vào), dẫn đến tín hiệu đầu ra thay đổi không liên tục. Hơn nữa, nếu cần tăng độ phân giải của hệ số khuếch đại thì phải tăng số bit điều khiển, tức là cần phải sử dụng một mạng chuyển mạch lớn. Điều này sẽ làm tăng độ phức tạp của mạch điện. Do vậy, các VGA được điều khiển bởi tín hiệu tương tự với hệ số khuếch đại thay đổi liên tục được sử dụng nhiều hơn.

* Tác giả chính: Email: lamtdvdt@gmail.com



Hình 1: sơ đồ VGA với hệ số khuếch đại được điều khiển theo phương pháp số [2]

Với cách tiếp cận hệ số khuếch đại được thay đổi liên tục, có 4 phương pháp điều khiển hệ số khuếch đại của một bộ VGA [1, 3], như trong hình 2, bao gồm: (a) biến đổi điện trở hồi tiếp, (b) biến đổi hồ dẫn của các phần tử CMOS hoạt động trong vùng bão hòa, (c) biến đổi điện trở tải, và (d) biến đổi điện trở suy giảm (các phần tử MOS hoạt động trong vùng tuyến tính).



Hình 2: các cấu trúc cho bộ VGA với hệ số khuếch đại biến đổi liên tục [3]

Với cách mắc biến đổi điện trở hồi tiếp (hình 2a) thì hệ số khuếch đại của bộ VGA được thay đổi nhờ thay đổi giá trị của điện trở hồi tiếp R_f . Biến trở này có thể được thiết kế ở dạng phần tử bán dẫn (Transistor) trường (Field-effect transistor - FET). Giải pháp này mang lại điểm chặn bậc 3 (Third-order intercept point - IP3) cao, tuy nhiên có nhược điểm là độ ổn định thấp và phạm vi điều khiển hệ số khuếch đại hẹp.

Giải pháp tiếp theo (hình 2b) sử dụng một mạng thiên áp để thay đổi hệ số khuếch đại bằng cách thay đổi các dòng thiên áp của các bóng bán dẫn điều khiển (qua đó thay đổi hồ dẫn của nó). Cách tiếp cận này có

lợi thế là tạp âm thấp, nhưng nhược điểm là độ tuyến tính của bộ khuếch đại phụ thuộc lớn vào dòng thiên áp.

Phương pháp thứ ba là sử dụng các bóng bán dẫn ghép cascode vì sai để điều khiển dòng điện qua tải R_L (hình 2c). Ưu điểm của phương pháp này là phạm vi điều chỉnh hệ số khuếch đại cao, tuy nhiên nhược điểm là có xu hướng bị ảnh hưởng bởi tạp nhiễu nhiều hơn so với các phương pháp khác.

Cách tiếp cận thứ tư (hình 2d) có thể coi như một biến thể của giải pháp thứ ba. Thay vì sử dụng các bóng bán dẫn bổ sung nhằm thay đổi giá trị dòng qua tải, hệ số khuếch đại được biến đổi bằng cách giảm dòng điện trong các bóng bán dẫn ghép tầng (cascade) M2 và bóng bán dẫn điều khiển chính M1.

Trong các giải pháp nêu trên, giải pháp biến đổi điện trở suy giảm có nhiều ưu điểm vượt trội là cho độ tuyến tính cao, tạp nhiễu thấp và mức độ tiêu hao năng lượng thấp, vì các điện trở suy giảm cực nguồn không làm tăng các điện áp headroom (điện áp tối thiểu giữa cực máng và cực nguồn của bán dẫn để đảm bảo bán dẫn hoạt động trong vùng bão hòa) trong các bộ KĐVS đơn giản.

Hơn nữa, như trình bày trong [4], việc cân nhắc sử dụng các bộ KĐVS hay khuếch đại đơn cực để đảm bảo chỉ tiêu kỹ thuật là rất quan trọng. Mặc dù các bộ khuếch đại đơn cực chỉ tiêu hao một nửa công suất và diện tích die (khuôn đúc) so với các bộ KĐVS, nhưng các bộ khuếch đại đơn cực nhạy cảm với độ hồ cảm cực đất và trở kháng của chất nền (substrate) hơn các bộ KĐVS. Đặc biệt, tính cảm của chất nền ảnh hưởng mạnh tới mặt phân cực ngược và thậm chí đến tính ổn định của bộ khuếch đại. Ngoài ra, các bộ khuếch đại đơn cực nhạy cảm với nhiễu nguồn và chất nền hơn rất nhiều so với các bộ KĐVS. Ngược lại, các bộ KĐVS có khả năng loại bỏ các nhiễu chế độ common-mode (CM). Các ưu điểm này của các bộ KĐVS làm đơn giản hóa rất nhiều thiết kế của một hệ thống thu phát hoàn thiện. Do đó, trong phạm vi nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất bộ VGA là sự kết hợp giữa cấu trúc vi sai với mô hình cách mắc suy giảm cực nguồn.

Cấu trúc bộ VGA đề xuất

Trong phần này, sơ đồ nguyên lý một bộ VGA hoạt động trong dải tần công tác lên đến 250 MHz theo

công nghệ CMOS 0,35 μm được xây dựng. Trong thiết kế VGA đề xuất, hệ số khuếch đại được biến đổi dựa trên quy luật hàm mũ gần đúng.

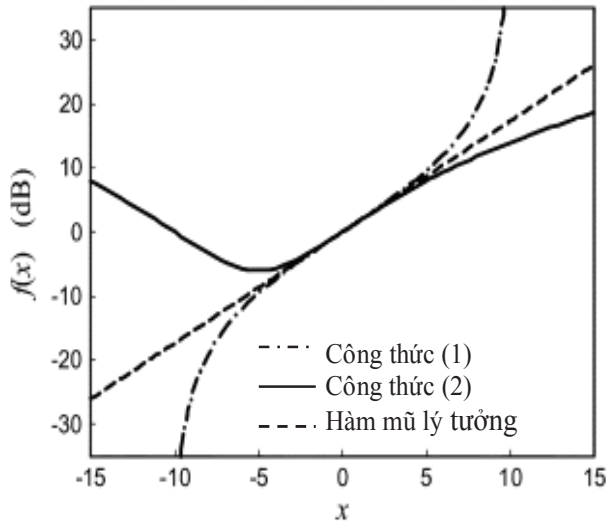
Cơ sở lý thuyết

Như trình bày trong [2], biến đổi chuỗi Taylor cho hàm mũ có thể được biểu diễn như sau:

$$f(x) = e^{2ax} \approx \frac{1+ax}{1-ax} \quad (1)$$

Với $|ax| \ll 1$, phép biến đổi này có thể được xấp xỉ như sau:

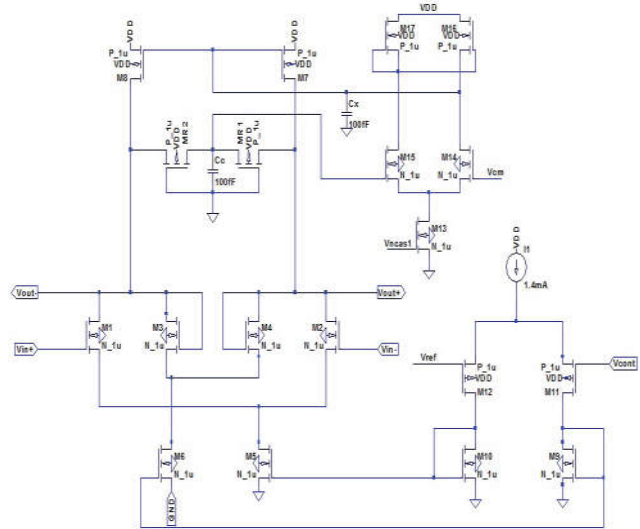
$$\begin{aligned} f(x) = e^{2ax} &\approx 1 + \frac{2a}{1!}x + \frac{(2a)^2}{2!}x^2 \\ &= \frac{1}{2}[1 + (1 + 2ax)^2] \end{aligned} \quad (2)$$



Hình 3: đồ thị mô tả hàm mũ lý tưởng và xấp xỉ [2]

Đồ thị hình 3 mô tả mối quan hệ của x và $f(x)$ theo dB, đồng thời so sánh với công thức hàm mũ lý tưởng. Như đã thấy, phạm vi biến thiên tuyến tính của phép tính xấp xỉ hàm mũ là khá rộng, khoảng 20 dB (từ -5 dB đến 15 dB). Vì quan hệ I/V của CMOS bán dẫn khi hoạt động trong vùng bão hòa tuân theo hàm mũ bậc hai, khá gần với công thức (2), nên cách tính hàm mũ xấp xỉ có thể được hiện thực bởi quan hệ I/V của bán dẫn. Nhằm mở rộng phạm vi biến đổi hệ số khuếch đại lớn hơn 20 dB, các tầng khuếch đại giống nhau có thể được ghép tầng. Do vậy, phương pháp này thường được áp dụng cho thiết kế VGA.

Cấu trúc mạch



Hình 4: sơ đồ nguyên lý bộ VGA đề xuất

Sơ đồ nguyên lý cho bộ VGA như trong hình 4. Trong đó, tất cả các bán dẫn hoạt động trong chế độ bão hòa, các cực bulk của các P-MOS được nối với V_{DD} , trong khi N-MOS được nối với GND. Tế bào khuếch đại bao gồm cặp kết nối cực nguồn source-couple đầu vào (M_1 và M_2) với các tải diode-connected (M_3 và M_4), với kích thước của M_1 và M_2 ; M_3 và M_4 bằng nhau, các dòng qua cặp bán dẫn đầu vào và tải là hằng số và bằng các nguồn dòng P-MOS M_7 và M_8 . Bộ điều khiển hệ số khuếch đại được xây dựng từ cặp kết nối cực nguồn M_9 - M_{12} . Cơ chế điều khiển hệ số khuếch đại đạt được bằng cách dùng nguyên lý gương dòng điện từ các dòng đầu ra vi sai của khối điều khiển khuếch đại, đến các dòng đuôi (M_5 và M_6) của cặp kết nối cực nguồn và cặp vi sai tải. Các bán dẫn dùng cho gương dòng điện là các phân tử kênh dài để đạt được độ chính xác tốt hơn.

Mạch hồi tiếp chế độ CM (Common - Mode Feedback - CMFB) được xây dựng bởi các bán dẫn M_{13} - M_{17} . Một vấn đề với bộ VGA là điện áp đầu ra một chiều thay đổi với các hệ số khuếch đại khác nhau. Vì với thiết kế VGA đa tầng, điện áp đầu ra một chiều của tầng này sẽ thiên áp cho tầng VGA phía sau. Nếu VGA không thể đưa ra một mức điện áp DC chính xác và ổn định ở đầu ra, nó sẽ định thiên các tầng phía sau tại các điểm làm việc khác nhau với các hệ số khuếch đại khác nhau. Với sơ đồ VGA đã đưa ra, sự biến thiên của điện áp DC đầu ra là tương đối nhỏ với các hệ số khuếch đại khác nhau, do các dòng điện

qua các nguồn dòng tạo bởi M_7 và M_8 là hằng số. Tuy nhiên, đường hồi tiếp chế độ CMFB vẫn cần thiết vì đầu ra DC rất nhạy cảm với những biến đổi của mức common-mode của điện áp điều khiển. Do vậy, không giống các phương pháp khác, khi giá trị tải đầu ra thay đổi với các hệ số khuếch đại khác nhau, mạch VGA đề xuất với đường hồi tiếp CMFB không ảnh hưởng đến chức năng khuếch đại của mạch.

Với phương pháp CMFB này, các bán dẫn M_{R1} , M_{R2} (làm việc ở vùng triode) và tụ điện C_x được sử dụng để cảm nhận sự biến đổi mức CM đầu vào. Các bán dẫn M_{14} - M_{17} hình thành một tầng khuếch đại và hồi tiếp độ sai lệch của điện áp CM và tín hiệu tham chiếu nhằm điều khiển các nguồn dòng được tạo ra bởi các bán dẫn P-MOS M_7 và M_8 .

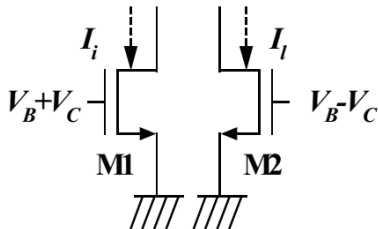
Tính toán hệ số khuếch đại

Bộ khuếch đại này đơn giản là một bộ khuếch đại cặp vi sai nối cực nguồn với các tải diode-connected. Khi các bán dẫn làm việc ở chế độ bão hòa, luật bậc hai cho quan hệ I/V được áp dụng. Khi cực bulk của tất cả các bán dẫn M_1 - M_4 được nối GND, hệ số KĐVS được xác định bằng tỷ số giữa hồ dẫn đầu vào và hồ dẫn tải [5]:

$$A_v = \frac{g_{m-input}}{g_{m-load}} = \sqrt{\frac{\mu_n C_{ox} (W/L)_i \cdot I_i}{\mu_n C_{ox} (W/L)_l \cdot I_l}} \quad (3)$$

$$A_v = K \sqrt{\frac{I_i}{I_l}}$$

Trong đó: μ_n là độ linh động của điện tử trong chất bán dẫn; C_{ox} là điện dung tổng giữa cực cổng của bán dẫn và GND; W , L lần lượt là chiều rộng, dài của phần tử bán dẫn; I_i , I_l lần lượt là dòng cực máng của M_5 , M_6 , tương ứng với nguồn dòng cung cấp cho các phần tử đầu vào, và phần tử tải: $K = \sqrt{\frac{(W/L)_i}{(W/L)_l}}$.



Hình 5: mạch điều khiển hệ số khuếch đại

Các bán dẫn M_5 và M_6 được định thiên để hoạt động trong vùng bão hòa tại điện áp V_B , và được áp một điện áp điều khiển vi sai V_C . Như vậy, so sánh với điện áp thiên áp cấp cho M_5 , M_6 trong hình 5, có mối liên hệ sau:

$$V_B = \frac{V_{Cont} + V_{bias4}}{2}$$

$$V_C = \frac{V_{Cont} - V_{bias4}}{2}$$

Các dòng I_i và I_l qua các bán dẫn M_5 và M_6 được cho như sau:

$$I_i = K_n (V_B + V_C - V_{Tn})^2$$

$$I_l = K_n (V_B - V_C - V_{Tn})^2$$

$$\text{Trong đó, } K_n = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \cdot \frac{W}{L}$$

Như vậy, tỷ lệ của dòng đầu vào và dòng qua tải được tính bởi:

$$\frac{I_i}{I_l} = \left(\frac{1 + \frac{V_C}{V_B - V_{Tn}}}{1 - \frac{V_C}{V_B - V_{Tn}}} \right)^2 = \left(\frac{1+x}{1-x} \right)^2 \approx e^{4x} \quad (4)$$

$$\text{Trong đó: } x = \frac{V_C}{V_B - V_{Tn}}$$

Hay có thể viết lại:

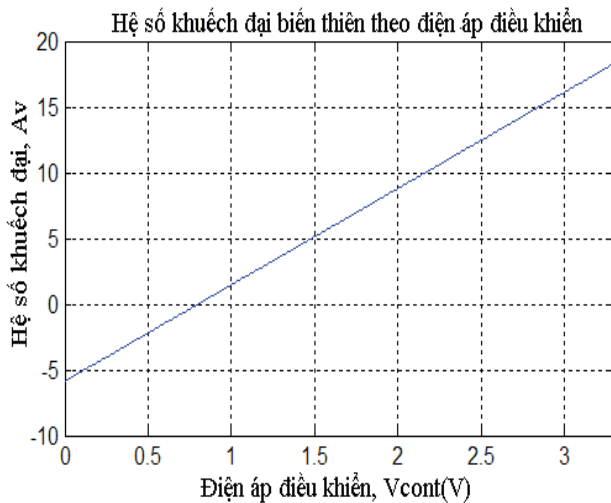
$$x = \frac{V_{Cont} - V_{bias4}}{V_{Cont} + V_{bias4} - 2V_{Tn}}$$

Thay (4) vào (3), hệ số khuếch đại là:

$$A_v = K \frac{1+x}{1-x} \quad (5)$$

Như vậy, công thức (5) có dạng như công thức (1). Từ đồ thị hình 3 cho thấy, phạm vi điều khiển hệ số khuếch đại trong vùng tuyến tính đạt từ -5 dB đến 15 dB bằng cách thay đổi x . Thêm vào đó, nếu muốn tịnh tiến hệ số khuếch đại lên thì có thể thay đổi tỷ lệ kích thước K giữa bán dẫn đầu vào và bán dẫn tải. Hệ số khuếch đại sẽ dịch lên 3 dB nếu K tăng gấp đôi.

Một cách cụ thể, giả sử $K = (W/L)_{1,2} / (W/L)_{3,4} = 2$; $V_{bias4} = 1,073$ V; và $V_{Tn} = 0,8$ V thì hệ số khuếch đại của bộ VGA biến thiên theo điện áp điều khiển V_{cont} như chỉ ra trong hình 6.



Hình 6: mối quan hệ giữa hệ số khuếch đại và điện áp điều khiển

Kết quả mô phỏng, phân tích và thảo luận

Để kiểm chứng các kết quả tính toán trên, công cụ mô phỏng LT-SPICE của hãng Linear Technology được sử dụng. Ở đây, chúng ta sẽ phân tích hoạt động tín hiệu nhỏ AC khi điểm làm việc DC được thiên áp như mong muốn. Phân tích AC được thực hiện trên miền tần số, ở đó đáp ứng tín hiệu nhỏ AC được tính toán sử dụng các tính toán số học phức tạp. Với mô phỏng này, chúng ta có thể khảo sát được thay đổi của hệ số khuếch đại theo điện áp đầu vào điều khiển. Các điện áp được cấp cho đầu vào V_{in+} và V_{in-} như sau:

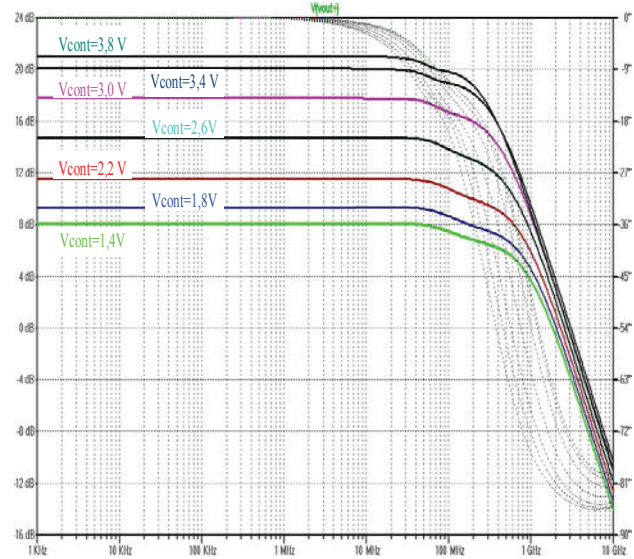
$$V_{in+} = 2,5 + 0,001 \sin(2\pi \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot t) \text{ (V)}$$

$$V_{in-} = 2,5 \text{ (V)}$$

Như vậy, các thành phần một chiều trong nguồn tín hiệu đầu vào V_{in+} và V_{in-} đảm bảo cặp vi sai được thiên áp ở điện áp một chiều 2,5 V. Điều này đảm bảo 2 transistor M_1 và M_2 hoạt động trong chế độ bão hòa. Với nguồn tín hiệu đầu vào này, tín hiệu vi sai cấp cho mạch VGA là tín hiệu dạng sin có tần số 250 MHz:

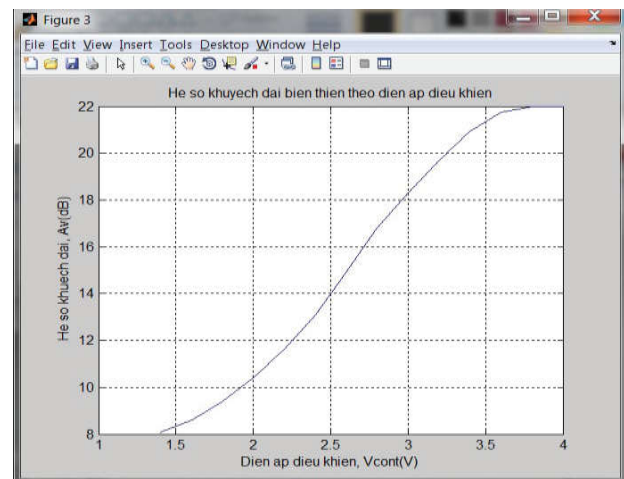
$$V_{DI} = 0,001 \sin(2\pi \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot t) \text{ (V)}$$

Hình 7 thể hiện kết quả mô phỏng đặc tuyến biên độ - tần số của bộ VGA cho một số giá trị điện áp điều khiển. Các kết quả này cho thấy, hệ số khuếch đại của bộ VGA biến thiên từ 8 dB đến 21 dB với điện áp điều khiển tăng từ 1,4 lên 3,8 V một cách tương ứng. Từ hình cho thấy, băng tần hoạt động 3 dB của bộ VGA là xấp xỉ 250 MHz.



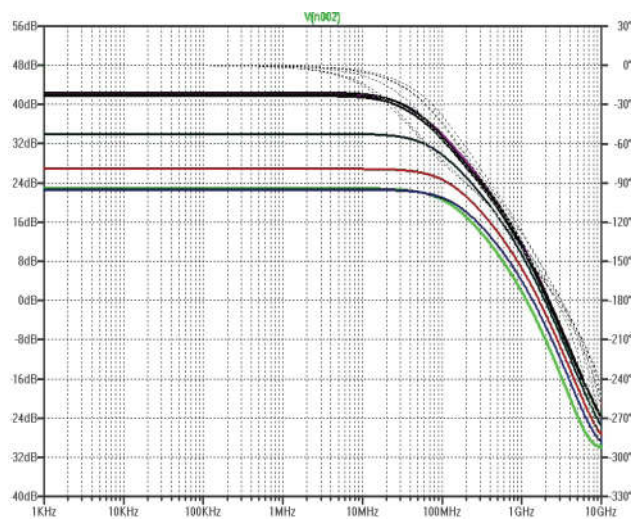
Hình 7: đặc tuyến biên độ - tần số của bộ VGA với điện áp điều khiển biến thiên

Hình 8 cho thấy sự thay đổi của hệ số khuếch đại từ 8 dB đến 21 dB theo điện áp điều khiển là xấp xỉ tuyến tính và liên tục trong toàn dải 1,4-3,8 V.



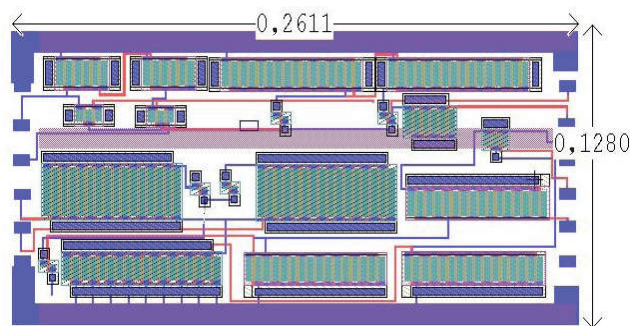
Hình 8: sự biến thiên của hệ số khuếch đại theo điện áp tín hiệu điều khiển

Khi muốn tăng dải biến đổi của hệ số khuếch đại, có thể thực hiện ghép tầng nhiều bộ khuếch đại đơn lại với nhau. Hình 9 cho kết quả mô phỏng của mối quan hệ biên độ - tần số cho bộ VGA hai tầng với điện áp điều khiển cũng biến thiên trong dải 1,4 đến 3,8 V. Khi đó hệ số khuếch đại tăng từ 22,5 lên 42 dB. Tuy nhiên, nhược điểm là băng thông bị giảm xuống còn xấp xỉ 60 MHz cho toàn dải điều khiển.



Hình 9: đặc tuyến biên độ - tần số của bộ VGA 2 tầng

Sau khi thực hiện mô phỏng, bộ VGA đề xuất được thực thi với công nghệ CMOS 0,35 μm . Trong hình 10 mô tả layout của die, có thể thấy kích thước của chip tương đối nhỏ, xấp xỉ 0,033 mm^2 .



Hình 10: layout chip VGA đề xuất chưa có bonpads

Bảng 1 là kết quả và so sánh hiệu năng của bộ VGA do nhóm tác giả đề xuất với các công trình nghiên cứu khác. Như vậy, chúng ta thấy rằng công trình [1] có sự vượt trội về băng thông, điều này có thể giải thích là [1] đã sử dụng công nghệ cao hơn (CMOS 0,18 μm). Mặc dù, với công nghệ cao hơn và với điện áp cung cấp thấp hơn, nhưng công suất tiêu thụ là tương đương với bộ VGA được đề xuất trong nghiên cứu này. Dải hệ số khuếch đại điều khiển là tương đương. Các công trình [3, 6, 7] cũng sử dụng cùng công nghệ CMOS 0,35; có được dải hệ số khuếch đại lớn hơn, nhưng băng thông thấp hơn nhiều so với giải pháp của chúng tôi. Mặc dù sử dụng nguồn cung cấp 5 V, nhưng kết quả mô phỏng cho thấy công suất tiêu thụ của mạch VGA đề xuất (7 mW) là ở mức trung bình so với các công trình khác.

Bảng 1: tổng hợp và so sánh hiệu năng của bộ VGA đề xuất

Tham số	[1]	[3]	[6]	[7]	Đề xuất
Công nghệ (μm)	0,18	0,35	0,35	0,35	0,35
Nguồn cung cấp (V)	1,8	3	1,65	1,8	5
Băng thông (MHz)	2000	10	49	175	250
Dải hệ số khuếch đại	5,1÷20,6	0÷22	0÷21,3	-18÷18	8÷21
Dải điện áp điều khiển (V)	0,9÷1,8	0÷1,1	-1÷-0,1	0,0075÷0,42	1,4÷3,8
Công suất (mW)	8	35	-	2,7	7

Kết luận

Trong nghiên cứu này, bộ khuếch đại có hệ số khuếch đại có thể thay đổi VGA sử dụng công nghệ CMOS 0,35 μm được đề xuất. Trên cơ sở phân tích, tính toán bộ VGA được thiết kế dựa trên cấu hình bộ KĐVS nhằm tăng tính chống nhiễu và tính tuyến tính. Trong đó, hệ số khuếch đại được biến đổi dựa trên biến đổi nguồn dòng cung cấp cho một cặp vi sai tải mắc theo kiểu diode-connected. Với thiết kế này, hệ số khuếch đại của bộ VGA được biến đổi một cách liên tục, dựa trên quy luật hàm mũ gần đúng thông qua thay đổi giá trị điện áp điều khiển đầu vào. Các kết quả mô phỏng cho thấy hệ số khuếch đại có thể thay đổi từ 8 đến 21 dB khi điện áp điều khiển thay đổi từ 1,4 đến 3,8 V. Ưu điểm của bộ VGA này là cho phép hoạt động ở tần số cao với công suất tiêu thụ trung bình. Dải tần số công tác cho phép của bộ VGA đề xuất là 0 đến 250 MHz, như kết quả mô phỏng đưa ra. Một ưu điểm nữa của sơ đồ mắc này là dải điện áp đầu vào và dải động đầu ra có thể được tinh chỉnh một cách dễ dàng, điều này rất phù hợp với thiết kế máy thu khi mức tín hiệu đầu vào biến đổi lớn.

Tài liệu tham khảo

- [1] Cameron Charles T, David Allstot J (2006), "A 2-GHz CMOS variable gain amplifier optimized for low noise", *ISCAS, IEEE*, pp.2305-2308.
- [2] Quoc Hoang Duong, Quan Le, Chang Wan Kim, Sang Gug Lee (2006), "A 95 dB linear low-power variable gain amplifier", *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, **53** (8), pp.1648-1657.
- [3] Yuanjin Zheng, Jiangnan Yan, Yong Ping Xu (2004), "A CMOS dB-linear VGA with pre-distortion compensation for wireless communication applications", *Circuits and Systems, ISCAS'04, Proceedings of the 2004 International Symposium on*, **1**, pp.1813-1816.
- [4] Razavi B (2001), "Design of analog CMOS integrated circuits", *McGraw - Hill*.
- [5] Jacob Baker R (2010), "CMOS Circuit Design, Layout, and Simulation (3rd ed.)", *Wiley-IEEE Press*.
- [6] Kyuyoung Chung, Gunhee Han, Sungho Kang (2000), "A 0.35 μm CMOS low noise VGA", *AP-ASIC 2000, Proceedings of the Second IEEE Asia Pacific Conference on*, pp.5-8.
- [7] Alegre J.P, Celma S, Calvo B, García del Pozo J.M (2007), "A 0.35 μm CMOS 1.8 V low-power 175 MHz variable gain amplifier", *Midwest Symposium on Circuits and Systems - MWSCAS*, pp.261-264.