

Entegre Dirençlerin Çift ve Tek Dereceli Bozulma Analizi

Ertan ZENCİR^{1*}

¹ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği, Türk Hava Kurumu Üniversitesi,
Ankara, Türkiye

*¹ ezencir@thk.edu.tr

(Geliş/Received: 30/10/2021;

Kabul/Accepted: 01/01/2022)

Öz: Yarı iletken yükselteçlerdeki bozulma, esas olarak aktif cihazların giriş-çıkış özelliklerinde karşılaşılan yüksek dereceli katsayılarından kaynaklanmaktadır. Bipolar jonksiyonlu transistörler (BJT), bir üstel diyot akım-gerilim ilişkisi ile modellendiğinde, polarlama akımından ve diğer BJT parametrelerinden bağımsız olarak, 7.33 dBm'lik giriş üçüncü dereceden intermodülasyon ürünü (IIP3) üzerinde bir üst sınır gösterir. CMOS transistörler için, kanal uzunluk modülasyonu ile birlikte doğrusal olmayan büyük sinyal davranışı, ortak-kaynak konfigürasyonunda savak akımında üçüncü dereceden intermodülasyon ürünleri üretme potansiyeline sahiptir. Doğrusallığı bozma kaynaklarının sadece aktif cihazlardan kaynaklandığı fikri, analog devreleri analiz ederken eksik ve/veya yanıltıcı sonuçlara yol açar. Dirençlerin doğrusal olmama durumları, sistemin IIP3 değerinin sınırladığı verimsiz/yanlış tasarım kararlarına ve gerilime bağlı doğrusal olmama neden olabilir. Bu makale, entegre dirençlerin doğrusallık bozulmalarını açıklar ve dirençlerin gerilim bağımlılığını sonlu IM3 ve IM2 ürünleri ile ilişkilendirir. Ayrıca, polisilyyum ve difüzyon dirençleri için direnç akımlarının IIP3 ve IIP2'si, genel devre doğrusallık gereksinimini sağlayacak şekilde direnç boyutlarının optimum seçimini gerçekleştirmek üzere kaleme alınmıştır.

Anahtar kelimeler: Entegre Direnç, Doğrusal Olmama, Bozulma.

Even and Odd Order Distortion Analysis of Integrated Resistors

Abstract: Distortion in semiconductor amplifiers is due mainly to higher order coefficients encountered in active device input-output characteristics. Bipolar junction transistors (BJT), when modeled by an exponential diode current-voltage relationship, show an upper limit on input third order intermodulation product (IIP3) of 7.33 dBm that is independent of bias current and other BJT parameters. For CMOS transistors, nonlinear large signal behavior accompanied by channel length modulation has the potential to generate third order intermodulation products in the drain current in a common source configuration. The notion that the sources of nonlinearity are due only to active devices leads to incomplete and/or misleading conclusions while analyzing analog circuits. Resistor nonlinearities can cause inefficient/incorrect design decisions overlooking the limiting of system IIP3 due resistors, voltage dependent nonlinearity. This paper describes on-chip resistor nonlinearities and relates the voltage dependency of resistors to finite IM3 and IM2 generation. IIP3 and IIP2 of resistor currents for polysilicon and diffusion resistors are derived for optimal design of resistor sizes to meet overall circuit linearity requirement.

Key words: Integrated Resistor, Nonlinearity, Distortion.

1. Giriş

Analog entegre devrelerin doğrusal çalışması, esas olarak, entegre devrenin genellikle kazanç bloklarını oluşturan aktif cihazların doğrusallığı ile belirlenir. Aktif cihaz doğrusallığına ek olarak, entegre dirençlerin rezistans değerlerinin, terminallerine uygulanan gerilime bağımlılığı, yüksek hassasiyetli çalışma gerektiren analog entegre devrelerin tasarımında bir doğrusallık sorunu oluşturur. Yüksek hassasiyetli devrelerde direnç etkisine yaygın bir örnek olarak, bir sayısal-analog dönüştürücünün (SAD) doğrusallığına esas olarak çıkış bloğunda bulunan akım-gerilim dönüştürücüde kullanılan işlemsel yükseltgeçin geri besleme direncinin etki etmesi [1-2] veya yüksek çözünürlüklü sıcaklık sensörlerindeki algılama dirençlerinin sensörün doğrusallığı üzerindeki etkisi gösterilebilir [3]. Direnç doğrusallığını araştıran en eski çalışmalardan biri [4], direncin doğrultucu özelliklerinin olmadığı varsayımıyla akımın gerilim ve üçüncü dereceden gerilim ifadelerine bağlı olduğu tek bir fonksiyon olarak akım-gerilim karakteristiğini ortaya atmıştır. Karbon dirençlerde [4] gözlenen gerilime bağlı direnç, yarı iletken dirençlerde de ikinci ve üçüncü dereceden akım bozulması şeklinde gözlenir. Direnç doğrusallığı, cihaz eşleştirme ve $1/f$ gürültüsünü çapraz ilişkilendiren bir analiz, basit bir karakterizasyon

* Sorumlu yazar: ezencir@thk.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: ¹ 0000-0002-7041-8352

modeli sağlar [5]. Direnç doğrusallığının hassas ölçülmesi, iki sentezleyici kullanılan çift frekans yöntemiyle yapılabilir [6]. Bu hassas ölçüm, teorik analiz kadar önemlidir [7].

Bu çalışmanın amacı, fiziksel akım-gerilim özelliklerine dayalı olarak polisilyum ve difüzyon entegre dirençlerin üçüncü derece intermodülasyon bozulma karakteristiklerini analiz etmektir. Yapılan analiz simülasyon sonuçları ile desteklenmektedir. Doğrusallığını etkileyen mekanizmalar ve doğrusallığı iyileştirmek için uygun tasarım görüşleri de tartışılmaktadır.

2. Entegre Dirençlerin İncelenmesi

2.1. Polisilyum Direnç Karakteristikleri

Entegre devre uygulamalarında direnç oluşturmak için çok sayıda malzeme kullanılmıştır. Özel yüksek performanslı analog işlemlerde bulunan püskürtmeli ince film dirençler, cihaz eşleştirme, sıcaklık katsayısı ve gerilim katsayıları açısından ölçülen en yüksek kalitede dirençlerdir [8]. Polisilyum dirençler, analog entegre devrelerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrusal olmayan davranışları genellikle analog simülasyon motorlarında hafife alınmıştır. Doğrusal olmayan etkilerden kaçınmak için analog tasarımcılar, fiziksel anlamda daha uzun dirençler kullanırlar, bu da daha büyük silisyum alanı ve dolayısıyla optimumun altında tasarım gerçekleştirmeleri ile sonuçlanır [9]. Bu nedenle, üzerinde çalışılan teknoloji için gerilimin doğrusallığının tam olarak anlaşılması gerekir.

Doğrusal olmayan bir dirençten geçen akım, polinomal bir ifade aracılığıyla gerilimi ile ilişkilendirilir. Genel bir polisilyum direncin rezistans değeri Denklem 1' deki gibi ifade edilir.

$$R_{poly} = R_{body} + 2R_{head} \quad (1)$$

Burada R_{body} , direncin ana polisilyum malzemesinin rezistansıdır ve R_{head} , dopant etkileşiminin yakınındaki terminallerden kaynaklanan dirençtir. Terminal direnci ihmal edildiğinde, polisilyum direncin rezistans değeri, birinci ve ikinci dereceden sıcaklık ve gerilim bağımlılığına sahip ana gövde direncine indirgenir ve Denklem 2' deki şekilde ifade edilir.

$$R_{poly} = R_{sh} \left(\frac{L}{W} \right) (1 + c_1 \Delta T + c_2 T^2) \left(1 + \frac{1}{1 + \alpha \left(\frac{v}{L} \right)^2} \right) \quad (2)$$

Polisilyum rezistans değeri sıcaklığa göre değişirken, direncin uçları arasındaki gerilim farkına da ikinci dereceden bir bağımlılık mevcuttur. Sabit bir sıcaklıkta, direncin değeri büyük ölçüde v/L oranına bağlıdır. L için çok büyük bir değer seçmek, direncin genişliğinde önemli bir artışa neden olacaktır. Bu nedenle, kabul edilebilir maksimum doğrusal olmama (ikinci veya üçüncü derece bozulma) için optimum uzunluğu bulmak amacıyla bir analiz yapılması gerekir. Denklem 2 kullanılarak yapılabilecek bir başka gözlem, direncin gerilim bağımlılığının akımda ikinci dereceden bozulma üretme potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Ancak, Bölüm 3'te ortaya konacak olan analiz, akımda çift dereceli yerine kübik doğrusal olmayanlığın varlığını göstermektedir.

2.2. Difüzyon Direnç Karakteristikleri

Genel bir difüzyon tabakası direncinin rezistansı Denklem 3' deki şekilde ifade edilebilir.

$$R_{diff} = R_{sh} \left(\frac{L}{W} \right) (1 + c_1 \Delta T + c_2 \Delta T^2) \left(1 + \alpha_1 \left(\frac{v}{L} \right) + \alpha_2 \left(\frac{v}{L} \right)^2 \right) \quad (3)$$

Burada R_{sh} difüzyon tabakasının levha direncidir, L direncin uzunluğudur, W direncin genişliğidir, c_1 birinci dereceden sıcaklık katsayısıdır, c_2 ikinci dereceden sıcaklık katsayısıdır, α_1 birinci derece gerilim katsayısı, α_2 ikinci derece gerilim katsayısı, ΔT oda sıcaklığından kayma ve v direncin terminaleri arasındaki diferansiyel gerilimdir. Difüzyon dirençlerin sıcaklık bağımlılığı, polisilyum dirençlere çok benzer. Polisilyum dirençten farklı olarak, difüzyon direncin gerilim bağımlılığı, hem birinci hem de ikinci dereceden diferansiyel gerilim bağımlılığına sahiptir, ancak kübik bir doğrusallık ifadesi mevcut değildir. Bölüm 3, üçüncü dereceden intermodülasyon oluşum mekanizmasını açıklamaktadır.

3. Bozulma Analizi

3.1. Polisilisyum Dirençlerde Doğrusal Olmama

Sabit bir sıcaklıkta Denklem 2 ile tanımlanan polisilisyum dirençten geçen akım Denklem 4' deki şekilde ifade edilir.

$$I_{poly} = \frac{v}{R_{poly}} = \frac{1}{R_{sh} \left(\frac{L}{W} \right)} \left(\frac{v}{1 + 1/(1 + \alpha(v/L)^2)} \right) \quad (4)$$

$v = 0$ ' da seri açılımı gerçekleştirerek ve $R_{o,poly} = R_{sh} \left(\frac{L}{W} \right)$ seçerek Denklem 4, Denklem 5' deki haline indirgenir.

$$I_{poly} = \frac{1}{R_{o,poly}} \left(\frac{1}{2} v + \left(\frac{\alpha}{4L^2} \right) v^3 - \left(\frac{\alpha^2}{8L^4} \right) v^5 + O(v^6) \right) \quad (5)$$

Üçüncü dereceden doğrusal olmayanlığı azaltmak için L mümkün olduğunca büyük seçilmelidir, bu da aynı direnç için daha yüksek W anlamına gelir. Polisilisyum dirençten geçen akım için giriş üçüncü dereceden kesişme noktası (*IIP3*), 3. dereceden bir yükseltgeçin birinci ve üçüncü derece katsayıları kullanılarak [10] Denklem 6' da ki şekilde ifade edilebilir.

$$A_{IIP3,poly} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{k_1}{k_3}} = \frac{4}{\sqrt{6\alpha}} L \quad (6)$$

Burada $k_1 = 1/(2R_{o,poly})$ ve $k_2 = \alpha/(4R_{o,poly}L^2)$ şeklinde ifade edilir. Denklem 6' da görüldüğü gibi, direnç akımının giriş üçüncü dereceden kesişme noktası gerilimi, direncin gerilim katsayısı ile ters orantılı ve direncin uzunluğu L ile doğru orantılıdır. Direnci içeren analog devrenin gerekli doğrusallığının bilinmesi ve direncin *IIP3*' ünün bu değerden daha yüksek bir değere ayarlanması, devre performansının direncin doğrusal olmama durumu ile sınırlandırılmamasını garanti edecektir. Tasarımcı, teknoloji parametresi α üzerinde kontrole sahip olmayabilir, ancak L seçimi üzerinde tam kontrole sahiptir. Denklem 5'te ikinci dereceden bir terim olmadığı için giriş ikinci dereceden kesişme noktasının (*IIP2*) sonsuz olduğuna dikkat edilmelidir.

3.2. Difüzyon Dirençlerde Doğrusal Olmama

Sabit bir sıcaklıkta difüzyon dirençten geçen akım Denklem 7' de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$I_{diff} = \frac{v}{R} = \frac{1}{R_{sh} \left(\frac{L}{W} \right)} \left(\frac{v}{1 + \alpha_1 \left(\frac{v}{L} \right) + \alpha_2 \left(\frac{v}{L} \right)^2} \right) \quad (7)$$

Denklem 7' nin $v=0$ ' da seriye açılması ve $R_{o,diff} = R_{sh} \left(\frac{L}{W} \right)$ olarak seçilmesi ile Denklem 8 elde edilir.

$$I_{diff} = \left(\frac{1}{R_{o,diff}} \right) v - \left(\frac{\alpha_1}{R_{o,diff}L} \right) v^2 + \left(\frac{\alpha_1^2 - \alpha_2}{R_{o,diff}L^2} \right) v^3 - \left(\frac{\alpha_1^3 - 2\alpha_1\alpha_2}{R_{o,diff}L^3} \right) v^4 + \left(\frac{\alpha_1^4 - 3\alpha_1^2\alpha_2 + \alpha_2^2}{R_{o,diff}L^4} \right) v^5 + O(v^6) \quad (8)$$

Doğrusal akım terimi olan $V/R_{o,diff}$ teknoloji parametreleri $R_{o,diff}$, α_1 , α_2 ve difüzyon levhasının uzunluğuna bağlı olan hem çift hem de tek derecelerden bozulma terimleri içerir. İkinci dereceden ve kübik doğrusal olmamayı azaltmak için L mümkün olduğunca büyük seçilmelidir, bu da aynı direnç için daha büyük W anlamına gelir.

Akım ifadesindeki sıfır olmayan gerilim katsayıları, direnç için sonlu *IIP3* ve *IIP2* değerlerini ifade eder. Denklem 6 ve Denklem 8'deki birinci ve üçüncü derece katsayılar kullanılarak giriş üçüncü dereceden kesişme noktası Denklem 9' da ifade edildiği şekilde türetilebilir.

$$A_{IIP3,diff} = \sqrt{\frac{4}{3} \left| \frac{k_1}{k_3} \right|} = \frac{2}{\sqrt{3(\alpha_1^2 - \alpha_2)}} L \quad (9)$$

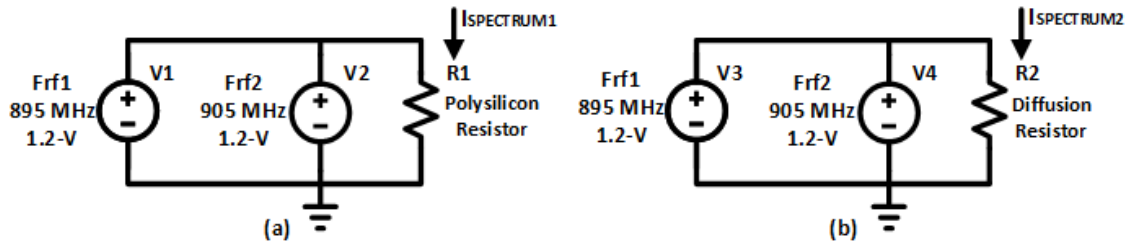
Burada $k_1 = 1/R_{o,diff}$ ve $k_3 = (\alpha_1^2 - \alpha_2)/(R_{o,diff}L^2)$ şeklinde ifade edilir. Denklem 9, difüzyon direnci akımının $IIP3'$ ünün direncin gerilim katsayıları ile ters orantılı olduğunu ve polisilyum direnç durumunda olduğu gibi direncin uzunluğu L ile doğru orantılı olduğunu göstermektedir. Benzer şekilde, giriş ikinci dereceden keşişim noktası ($IIP2$) Denklem 10' da verildiği şekilde ifade edilebilir [7].

$$A_{IIP2,diff} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{1}{\alpha_1} L \quad (10)$$

$IIP3'$ e benzer bir şekilde, difüzyon direncinin $IIP2'$ si, birinci dereceden gerilim katsayısı α_1 ile ters ve L ile doğrusal orantılı olarak değişir. Böylece direnç uzunluğunu seçme kararı, devrenin doğrusallık gereksinimi göz önünde bulundurularak yapılabilir.

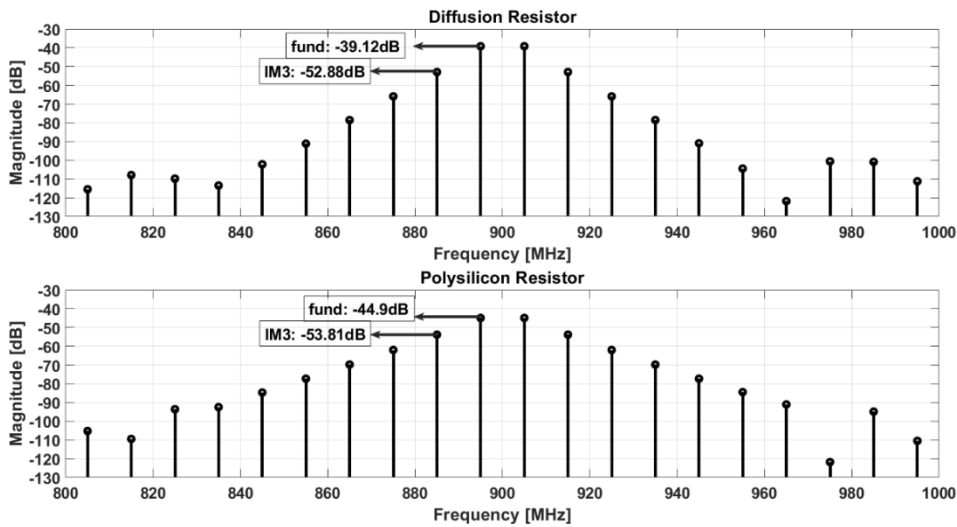
4. Direnç Doğrusallığı Simülasyon Sonuçları

Önceki kısımda belirtilen analizi doğrulamak için Şekil 1' de verilen test devresi, Cadence: Virtuoso bilgisayar destekli tasarım programı ile TSMC 65nm standart CMOS tasarım parametreleri kullanılarak kurulmuştur.



Şekil 1. İki tonlu (a) polisilyum, (b) difüzyon direnç test devresi

Şekil 1' de gösterilen iki tonlu test devresinde, direnç üzerinden akan akımın zaman düzlemindeki simülasyon sonuçlarının Fourier dönüşümü gerçekleştirildiğinde Şekil 2' deki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 2. Direnç zamana bağlı akımların Fourier dönüşümü

Burada gösterilen IM3 ve temel tonların büyüklük değerlerine göre IIP3 değerleri aşağıdaki metodoloji ile hesaplanmıştır.

$$\Delta I_{dB} = I_{fund,dB} - I_{IM3,dB} \quad (11)$$

$$\Delta I_{linear} = 10^{\left(\frac{\Delta I_{dB}}{20}\right)} \quad (12)$$

$$\Delta I_{linear,rms} = \frac{\Delta I_{linear}}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$\Delta I_{dBm} = 10 \log \left(\frac{\Delta I_{linear,rms}^2 * R}{10^{-3}} \right) \quad (14)$$

$$V_{in,rms} = \frac{V_{in}}{\sqrt{2}} \quad (15)$$

$$V_{in,dBm} = 10 \log \left(\frac{V_{in,rms}^2}{10^{-3} * R} \right) \quad (16)$$

$$IIP_3 = V_{in,dBm} + \frac{\Delta I_{dBm}}{2} \quad (17)$$

Bu metodoloji kullanılarak farklı direnç boyutları için IIP3 değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 1' de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 1. Direnç IIP3 simülasyon sonuçları

	<i>Polisilyum Direnç</i>						<i>Difüzyon Direnç</i>					
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	R ₇	R ₈	R ₉	R ₁₀	R ₁₁	R ₁₂
Direnç (Ω)	60.6	57	58.3	59	59.3	59.5	55.7	54.8	56.5	57.3	57.7	58
Genişlik (μm)	0.1	0.5	1	2	4	8	0.1	0.5	1	2	4	8
Uzunluk (μm)	0.5	2	4	8	16	32	0.5	2	4	8	16	32
IIP3 (dBm)	34.66	37.69	40.8	41.11	45.21	49.8	35.64	40.25	44.5	46.22	51.82	57.7

5. Sonuç

Gerilim bağımlı direnç ifadelerinden başlayarak direnç akımlarında ikinci ve üçüncü derece katsayıların üretimini göstermek için entegre polisilikon ve difüzyon dirençlerinin doğrusal olmama analizler sunulmuştur. Analog devrelerin doğrusal olmayan davranışındaki ana etken aktif cihazlardır, ancak uygun şekilde analiz edilmediğinde entegre dirençler de doğrusal olmama kaynağı olabilir. Bu, aslında uygun boyut seçimleriyle ortadan kaldırılacak olan ideal altı tasarım kararlarına yol açabilir. Bu çalışmada sunulan analiz, bir polisilikon direncin IIP3'ünün direncin uzunluğu ile doğru orantılı olduğunu ve böylece direncin kullanıldığı devrenin IIP3 gereksinimini bilerek optimum bir tasarımın mümkün olduğunu göstermektedir. Ayrıca difüzyon direnci akımlarının IIP2 ve IIP3'ünün her ikisinin de direncin uzunluğuna doğrusal olarak bağlı olduğu gösterilmiştir. Bu makalede gösterilen yöntem, daha iyi doğrusallık ve ideal boyutta direnç seçimleri için farklı direnç gerilim değerlerine göre uygulanabilir.

Kaynaklar

- [1] P. Steinmann and E. Beach. Simple analytical model of the thermal resistance of resistors in integrated circuits, *IEEE Trans. Electron Devices*, 2010; 57(5): 1029–1036.
- [2] S. Kuboki, K. Kato, N. Miyakawa and K. Matsubara. Nonlinearity analysis of resistor string A/D converters, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 383-390, 1982.
- [3] S. Pan, Y. Luo, S. Heidary Shalmany and K. A. A. Makinwa. A Resistor-Based Temperature Sensor With a 0.13 pJ · K² Resolution FoM in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 1, pp. 164-173, 2018.
- [4] T. Williams and J. Thomas. Current Noise and Nonlinearity in Carbon Resistors, *IRE Trans. Compon. Parts*, 1958; 13: 112–114.
- [5] S. D. M. Da Rold, S. Van Huylenbroeck, B. Knuts, E. Simoen. On the Basic Correlation between Polysilicon Resistor Linearity, Matching and 1/f Noise. *Proceedings of the 29th European Solid-State Device Research Conference*, 1999: 648–651.
- [6] Wambacq P, Sansen W. (1998) Description of nonlinearities in analog integrated circuits. In: *Distortion Analysis of Analog Integrated Circuits. The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science (Analog Circuits and Signal Processing)*, vol 451. Springer, Boston, MA.
- [7] Minowa and H. Tominaga. Resistor's Linearity Testing, *Electromagn. Meas. Dig.*, 2004; 1: 356–357.
- [8] W. Lane and G. Wrixon. The design of thin-film polysilicon resistors for analog IC applications. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1989; 36(4): 738–744.
- [9] R. Virkus, D. Weiser, K. Green, D. Richardson, and G. Westphal. Modeling of non-linear polysilicon resistors for analog circuit design. *Proc. of Int. Conf. Microelectron. Test Struct.*, 2001; 14: 89–91.
- [10] B. Razavi. *RF Microelectronics* (Pearson, Upper Saddle River, NJ, 2012)