



## CNTFET VDGA based ultra-low power low voltage high frequency filter applications

Şeyda Sunca Ulusoy<sup>1\*</sup> , Mustafa Alçı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electricity and Energy, Vocational School of Technical Sciences, Kayseri University, 38280, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Electrical Electronics Engineering, Faculty Engineering, Erciyes University, 38030, Kayseri, Türkiye

### Highlights:

- Realization of CNTFET VDGA simulation studies
- Realization of voltage mode filter structure with CNTFET VDGA structure
- CNTFET VDGA filter structure provides a good alternative for applications implemented with CMOS

### Keywords:

- CNTFET
- VDGA
- Low voltage
- Low power
- Universal active element

### Article Info:

Research Article

Received: 23.12.2022

Accepted: 24.08.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1223428

### Correspondence:

Author: Şeyda Sunca Ulusoy

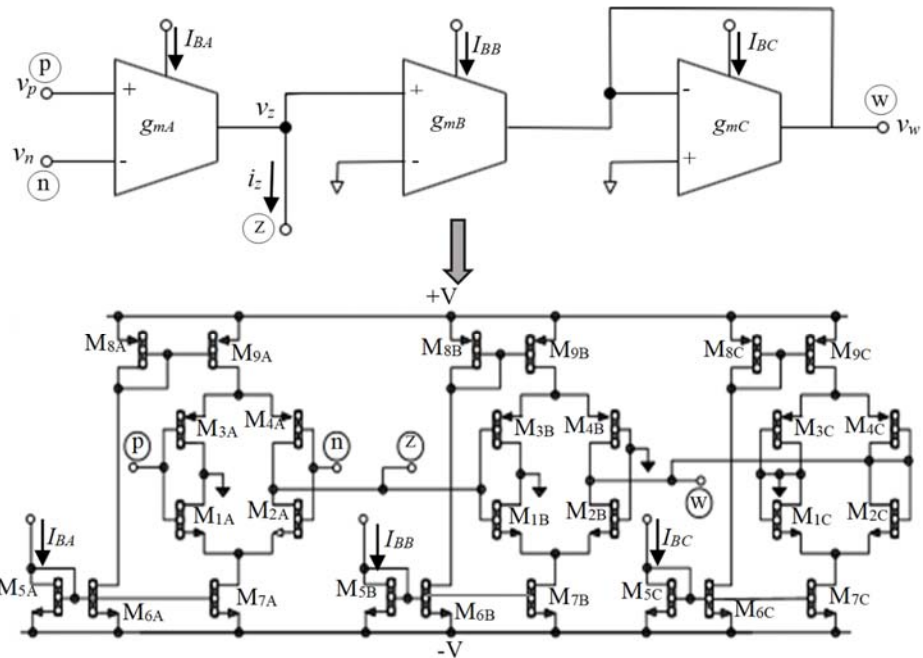
e-mail:

seydasunca@kayseri.edu.tr

phone: +90 554 679 9877

### Graphical/Tabular Abstract

In this study, Voltage Differencing Gain Amplifier universal active element is proposed using 32 nm CNTFET technology. CNTFET VDGA structure is given in Figure A. DC and AC analyzes of the circuit were performed using the Spice program. In addition, the CNTFET VDGA structure has been applied to the voltage mode three-input single-output filter structure. It has been determined that this filter structure can be controlled with different bias currents.



**Figure A.** Internal structure of CNTFET VDGA

### Purpose:

The aim of the study is to realize high performance universal active element structures at lower voltage and lower power consumption.

### Theory and Methods:

Different alternative elements have been sought to overcome many problems that arise with the reduction of the channel length of CMOS technology. CNTFET is a good solution, offering advantages such as lower power consumption, smaller size and scalability.

### Results:

The input voltage of the CNTFET VDGA structure realized with a supply voltage of  $\pm 0.3$  V and a bias current of  $1 \mu\text{A}$  was found to be approximately  $\pm 100$  mV without significant distortion. In addition, the transconductance value of this structure was determined as  $29.59 \mu\text{S}$ . The center frequency of the filter structure made with CNTFET VDGA was found to be  $22.909$  MHz and also the power consumption was found to be  $8.3412 \mu\text{W}$ .

### Conclusion:

It has been found that the CNTFET VDGA filter structure is suitable for applications requiring lower supply voltage, ultra-low power consumption and high center frequency.



## CNTFET VDGA tabanlı ultra düşük güç düşük voltaj yüksek frekanslı filtre uygulamaları

Şeyda Sunca Ulusoy<sup>1\*</sup>, Mustafa Alçı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kayseri Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 38280, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup>Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 38030, Kayseri, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- CNTFET VDGA benzetim çalışmalarının gerçekleştirilmesi
- CNTFET VDGA yapısı ile voltaj modlu filtre yapısının gerçekleştirilmesi
- CNTFET VDGA filtre yapısının CMOS ile gerçekleştirilmiş uygulamalar için iyi bir alternatif oluşturması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.12.2022

Kabul: 24.08.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1223428

### Anahtar Kelimeler:

CNTFET,  
VDGA,  
düşük voltaj,  
düşük güç,  
üniversal aktif eleman

### ÖZ

MOSFET boyutlarının ölçeklendirilmesinde sınır değere yaklaşılmasıyla birlikte birçok problem ortaya çıkmıştır. MOSFET'in boyutlarının küçültülmesiyle ortaya çıkan kısa kanal etkileri ve azaltılmış geçit kontrolü gibi birçok problemler için alternatif çözüm yolları araştırılmıştır. Karbon Nanotüp Alan Etkili Transistör (CNTFET- Carbon Nanotubes Field Effect Transistors) üstün elektriksel ve mekaniksel özellikleri ile MOSFET' in yerini alacak en uygun alternatif olarak düşünülmektedir. Bu çalışmada, 32 nm CNTFET kullanılarak Voltaj Farkı Alan Kazanç Kuvvetlendirici (VDGA-Voltage Differencing Gain Amplifier) yapısının benzetim çalışmaları yapılmıştır. Buna ek olarak CNTFET VDGA yapısı ile üç girişli tek çıkışlı filtre yapısı sunulmuştur.  $\pm 0.3V$  düşük besleme voltajında ve  $1\mu A$  düşük kutuplama akımında gerçekleştirilen filtre yapısı, CMOS VDGA ile gerçekleştirilen filtre yapısına kıyasla 22,909 MHz gibi daha yüksek merkez frekansına sahiptir. Ayrıca CNTFET VDGA yapısıyla gerçekleştirilen filtre 8,3412  $\mu W$  düşük güç tüketimine sahiptir.

## CNTFET VDGA based ultra-low power low voltage high frequency filter applications

### H I G H L I G H T S

- Realization of CNTFET VDGA simulation studies
- Realization of voltage mode filter structure with CNTFET VDGA structure
- CNTFET VDGA filter structure provides a good alternative for applications implemented with CMOS

### Article Info

Research Article

Received: 23.12.2022

Accepted: 24.08.2023

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1223428

### Keywords:

CNTFET,  
VDGA,  
low voltage,  
low power,  
universal active element

### ABSTRACT

With approaching the limit value, many problems have arisen in the scaling of MOSFET sizes. Alternative solutions have been investigated for many problems such as short channel effects and reduced gate control, which are caused by reducing the size of the MOSFET. Carbon Nanotube Field Effect Transistor (CNTFET) is considered as the most suitable alternative to replace MOSFET with its superior electrical and mechanical properties. In this study, simulation studies of Voltage Differencing Gain Amplifier structure were carried out using 32 nm CNTFET. In addition, a three-input single-output filter structure is presented with the CNTFET VDGA structure. The filter structure realized at  $\pm 0.3V$  low supply voltage and  $1\mu A$  low bias current has a higher center frequency of 22.909 MHz compared to the filter structure realized with CMOS VDGA. In addition, the filter made with CNTFET VDGA structure has a low power consumption of 8.3412  $\mu W$ .

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*seydasunca@kayseri.edu.tr, malci@erciyes.edu.tr / Tel: +90 554 679 9877

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda, daha hızlı ve daha verimli özellikleriyle, metal oksit-yarı iletken alan etkili transistörler (MOSFET'ler), farklı uygulamalarla tüm yarı iletken endüstrisinde sıkça tercih edilmektedir. Yarı iletken teknolojisi için en önemli hususlardan biri, transistörün boyutunu küçültmek ve transistörlerin tek bir çipte entegrasyonunu artırmak olmuştur [1]. 1965'te Dr. Gordon E. Moore, entegre devre (Integrated Circuit-IC) üzerindeki transistörlerin sayısında bir artış oranı öngörmüştür. Bu artış oranına göre bir IC üzerindeki transistör sayısının her iki yılda iki kat artacağı tahmin edilmiştir [2]. Ancak yarı iletken elemanların nano rejime girmesi ve sürekli olarak küçülmesiyle birlikte MOSFET'in performansı düşmektedir. Mikroelektronik üretim teknolojilerindeki gelişmelerle transistör kanal uzunluğu 10 nm'nin altına düştüğünde, transistörlerde kısa kanal etkileri ve kaynak ile akaç arasındaki doğrudan tünelleme, silikon elemanların ölçeklendirilmesinde büyük bir problem oluşturmıştır. Yüksek  $k$  kapılı dielektrikler ve çeşitli metaller gibi yeni malzemelerin entegrasyonu, CMOS ölçeklemenin evrimsel yolunu yöneten itici faktör olmuştur. Ancak silikonun sürekli ölçeklenmesi yerine, transistör performansı ve hızındaki iyileştirmelerin yeni malzemelerden gelmesi gerektiği tespit edilmiştir [3].

MOSFET için FinFET, TFET ve JLTFET vb. birçok alternatif eleman önerilmiştir ancak bu alternatifler birçok dikkate değer nedenden dolayı CNTFET ile rekabet edememiştir [4-6]. FET'lerde kullanılacak ideal bir yarı iletken arayışında Karbon Nanotüplerin (CNT-Carbon Nanotubes) umut verici özellikleri iyi bir seçenek olduğunu göstermektedir. Doğal ultra ince gövdesi, verimli elektron ve delik taşıma özellikleri, makul enerji boşluğu, 10 nm altı rejime ölçeklenen diğer yarı iletkenlerle karşılaştırıldığında en iyi çözümleri sunmuştur [7]. CNTFET neredeyse balistik çalışma sağlayan ve geri saçılımı en aza indiren benzersiz bir 1D bant yapısına sahiptir. Bunlara ek olarak aynı boyutlara sahip n-tipi ve p-tipi CNTFET özdeş hareketliliklere sahiptir. Bu nedenle, CNTFET'in yüksek performansı ve daha küçük boyutları ile yeni nesil VLSI yongaları için tercih edilen eleman olarak kabul edilmektedir [8].

Daha önceden literatürde var olan CMOS ile gerçekleştirilmiş universal aktif elemanların bazıları CNTFET yapısı ile de gerçekleştirilmiştir [9-12]. Bu çalışmalarda, tasarlanan bu elemanların düşük voltaj ve düşük güç tüketiminde daha yüksek bant genişliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada VDGA yapısının CNTFET ile benzetimi gerçekleştirilmiştir. VDGA yapısıyla birlikte, çeşitli uygulamalar geliştirmek için harici kutuplama akımlarını kullanarak geçiş iletkenliği kazançları vasıtasıyla çıkış akımları ve voltaj kazançları kontrol edilebilmektedir. Geçmiş yıllarda CMOS VDGA yapısı kullanılarak filtre, osilatör, memristör emülatörü vb. devreler gerçekleştirilmiştir [13-15]. Bu çalışmada yeni bir yaklaşım olarak CNTFET VDGA yapısı üç girişli tek çıkışlı voltaj modlu filtre yapısına uygulanmıştır. Filtre yapısı  $\pm 0.3V$  düşük besleme voltajı ve  $1\mu A$  kutuplama akımı ile test edilmiştir. Ayrıca, literatürde var olan CMOS VDGA filtre yapıları ile karşılaştırması yapılarak CNTFET VDGA yapısının avantajları gösterilmeye çalışılmıştır.

## 2. Malzeme ve Deneyisel Metot (Material and Experimental Method)

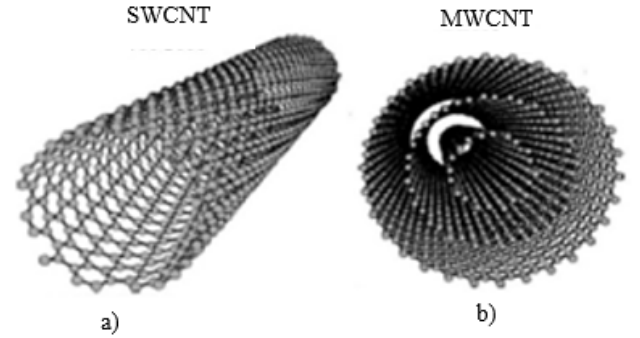
### 2.1. CNTFET Yapısı (CNTFET Structure)

CNT bir karbon allotropudur ve ilk olarak 1991 yılında S. Iijima [16] tarafından keşfedilmiştir. Şekil 1'de gösterildiği üzere CNT'ler çok duvarlı (Multi-MWCNT) veya tek duvarlı (Single-SWCNT) olabilmektedir. Bir MWCNT birden fazla silindirden oluşurken, bir SWCNT tek bir silindirden oluşmaktadır [17]. Grafit levha Şekil

2'deki gibi gösterilmektedir. CNT, bu grafit tabakanın altıgen yapısı deforme edilmeden silindire yuvarlanmasıyla elde edilmektedir. Tüp levhanın karbon atomlarının düzeni kiral vektörü ( $C_h$ ) ile belirlenmektedir. Kiral vektörü Eş. 1'de verilmiştir [2].

$$\vec{C}_h = n_1 \vec{a}_1 + n_2 \vec{a}_2 \quad (1)$$

Burada,  $a_1$  ve  $a_2$  altıgen yapısının birim vektörleri,  $n_1$  ve  $n_2$  kiral indisleri olarak adlandırılır. Kiral indislerine bağlı olarak CNT yapısı üç farklı yapı tipine ayrılır. Bunlar koltuk, zikzak ve kiral tipidir.  $n_1=0$  veya  $n_2=0$  olması durumunda zikzak yapıda,  $n_1=n_2$  olması durumunda koltuk yapıda ve  $n_1 \neq n_2 \neq 0$  olması durumunda CNT kiral yapıdadır. CNT'nin elektriksel özellikleri kiral indisleri ile belirlenmektedir.  $n_1 - n_2 \neq 3i$  ( $i$  tamsayıdır) olması durumunda CNT yarıiletken özellik gösterecektir [2].  $n_1=n_2$  veya  $n_1-n_2=3i$  olması durumunda ise metalik özellik gösterecektir [18]. Bu nedenle CNT türlerinden koltuk yapısı her zaman metalik özellik gösterirken zikzak yapısı yarıiletken özellik göstermektedir [19].



Şekil 1. a) Tek duvarlı CNT, b) Çok duvarlı CNT [20]  
(a) Single-walled CNT, (b) Multi-walled CNT)

CNT çapı, kiral indisleri kullanılarak Eş. 2 ile hesaplanabilmektedir;

$$D_{CNT} = \frac{a\sqrt{n_1^2 + n_1n_2 + n_2^2}}{\pi} \quad (2)$$

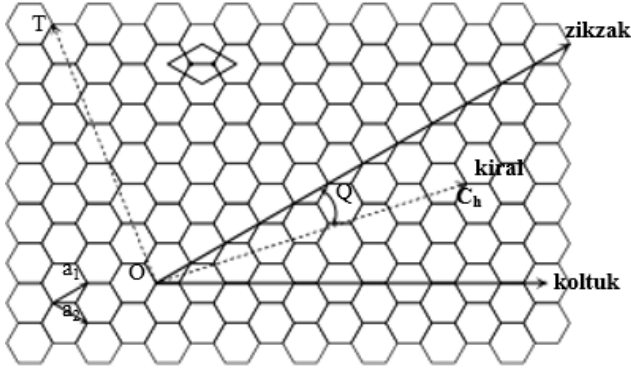
Burada  $a$  karbon atomları arası mesafedir ve yaklaşık olarak 0,249 nm'dir. MOSFET'lerde olduğu gibi CNTFET'ler de eşik voltaja sahiptir. CNTFET'in eşik voltajı  $V_{th}$  değeri Eş. 3 ile hesaplanabilmektedir;

$$V_{th} = \frac{aV_{\pi}}{\sqrt{3eD_{CNT}}} \quad (3)$$

Burada  $V_{\pi}$ , 0,303 eV değerinde sıkı bağ modelinde karbon  $\pi$ - $\pi$  bağ enerjisidir.  $e$  birim elektron yüküdür. CNT transistörünün genişliği ( $W$ ); CNT'nin çapı ( $D_{CNT}$ ), CNT'lerin sayısı ( $N$ ) ve CNT'ler arası adım ( $S$ ) gibi yapısal parametreler kullanılarak hesaplanabilmektedir:

$$W = (N-1)S + D_{CNT} \quad (4)$$

Eş. 3 ve Eş. 4, bir CNTFET'in eşik voltajının, CNT'nin çapı ile ters orantılı olduğunu gösterir. Bu nedenle, eşik voltajı basitçe CNT'nin çapı veya kiralite vektörü değiştirilerek ayarlanabilir. Örneğin, bir CNTFET, kanal olarak  $(n_1, n_2) = (19, 0)$  kiralite vektörlerine sahip CNT kullanıyorsa, tüpün yarıçapı  $D_{CNT}$  1,487 nm olacaktır. Eş. 3'ten eşik voltajının da 0,293 V olduğu tespit edilmektedir [21].



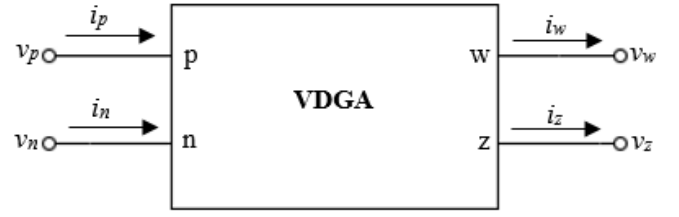
Şekil 2. Grafit Tabakası [3] (Graphite Layer)

Diğer FET'lerde olduğu gibi, CNTFET kaynak ve akış arasındaki yük akışına dik bir alan uygulayarak eleman kanalındaki taşıyıcı yoğunluğunun kontrolü için üçüncü terminal olan geçiti kullanır. Kanal bölgesinde gerekli olan yarı iletken SWCNT'lerin sayısı, mevcut sürücü gereksinimine göre farklılık göstermektedir. Kaynak ve akış bölgeleri arasındaki taşıyıcı taşıma işlemi, CNT'ler aracılığıyla gerçekleşir ve balistik taşıma özelliğini kullanır [21].

### 2.1. VDGA (VDGA)

Şekil 3'de sembolik olarak gösterildiği gibi, VDGA yüksek empedans terminalleri  $p$ ,  $n$ ,  $z$ 'e ve düşük empedans terminali  $w$ 'ye sahiptir [22].  $v_p$  ve  $v_n$  voltajlarının farkı,  $g_m$  geçiş iletkenliği kullanılarak  $z$  terminalinde akım  $i_z$ 'e dönüştürülür. Bu terminaldeki  $v_z$  voltajı  $\beta$  voltaj kazancı ile  $w$  terminalinde  $v_w$  voltajına aktarılır. İdeal çalışmada, VDGA'nın terminal ilişkileri Eş. 5 ile karakterize edilebilir:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_n \\ i_z \\ v_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ g_{mA} & -g_{mA} & 0 \\ 0 & \beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_n \\ v_z \end{bmatrix} \quad (5)$$



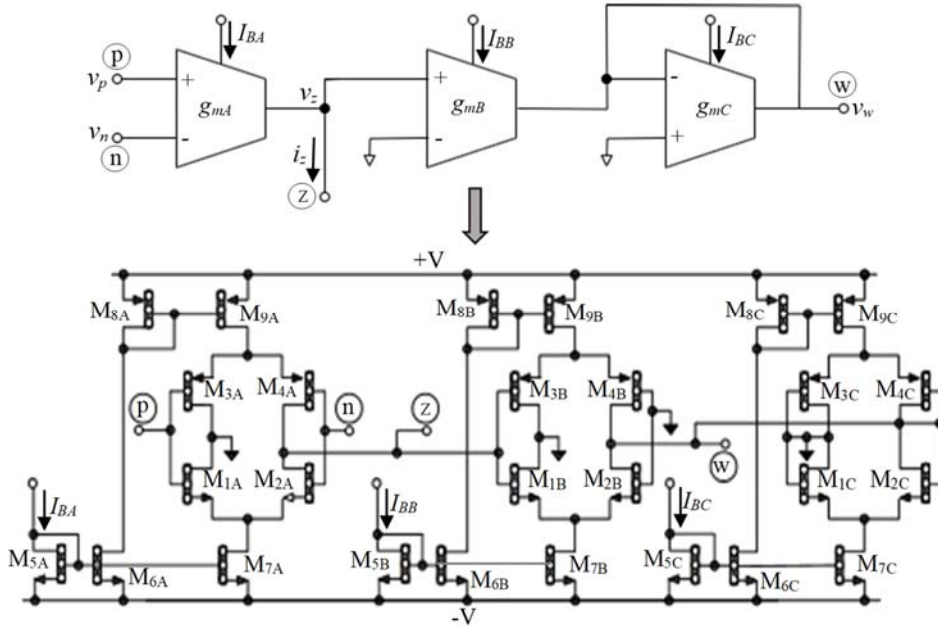
Şekil 3. Voltaj Farkı Alan Kazanç Yükselticisinin (VDGA) sembolik gösterimi  
(Symbolic representation of Voltage Differencing Gain Amplifier (VDGA))

Şekil 4'de CNTFET ile gerçekleştirilmiş VDGA yapısı üç Arbel-Goldminz geçiş iletkenliği hücresinden oluşmaktadır [23]. Bu geçiş iletkenliği hücreleri için geçiş iletkenliği değerleri  $g_{mA}$ ,  $g_{mB}$ ,  $g_{mC}$  indisleri ile tanımlanmaktadır.  $g_{mA} = i_z/v_p - v_n$  ile elde edilir ve  $I_{BA}$  kutuplama akımıyla kontrol edilmektedir.  $\beta$  voltaj kazancı,  $g_{mB}$  ve  $g_{mC}$  geçiş iletkenliği değerlerinin oranıyla ( $\beta = v_w/v_z = g_{mB}/g_{mC}$ ) belirlenmektedir.  $g_{mB}$  ve  $g_{mC}$  geçiş iletkenliği değerleri sırasıyla  $I_{BB}$  ve  $I_{BC}$  kutuplama akımları ile kontrol edilebilmektedir.

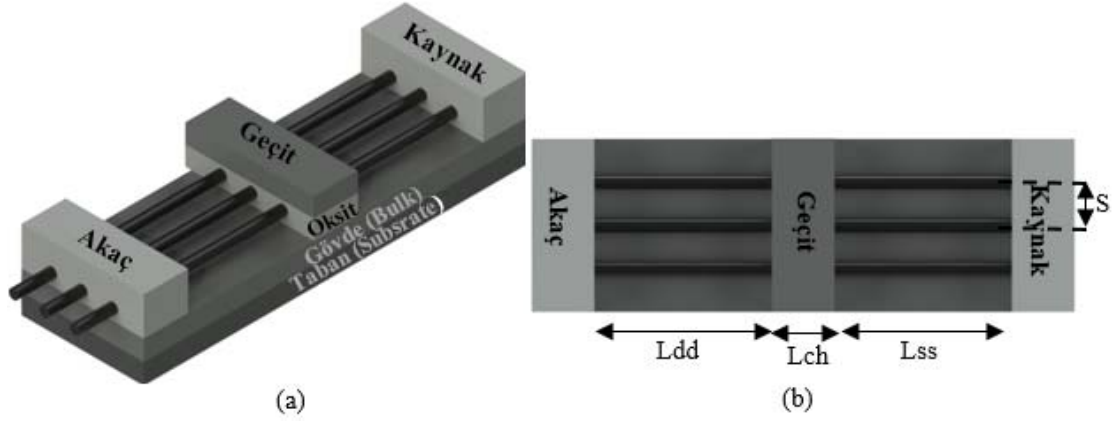
### 3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

#### 3.1. CNTFET VDGA'nın Benzetim Çalışmaları (Simulation Studies of CNTFET VDGA)

Tasarlanan VDGA yapısının benzetim çalışmaları 32 nm CNTFET teknolojisi kullanılarak SPICE benzetim programı ile yapılmıştır. Bu benzetim çalışmalarını gerçekleştirmek için Stanford CNTFET modeli kullanılmıştır [24]. Bu model, Şekil 5'de verilen tek kutuplu MOSFET-benzeri CNTFET yapısı için tasarlanmıştır [25]. CNTFET modelinin ana parametreleri ve değerleri Tablo 1'de verilmiştir. CNTFET VDGA'nın DC ve AC özelliklerini elde etmek için kullanılan CNT transistörlerin tüp sayısı Tablo 2'de verilmiştir. Eşitlik 4 kullanılarak CNT transistörlerinin genişlik ( $W$ ) değerleri hesaplanmıştır. CMOS VDGA [22] yapısının benzetim çalışmalarında besleme voltajları  $V_{DD} = -V_{SS} = 1,5$  V olarak belirlenirken, Şekil 4'de verilen CNTFET VDGA yapısında besleme



Şekil 4. CNTFET VDGA'nın İç Yapısı. (Internal Structure of CNTFET VDGA)



Şekil 5. MOSFET-benzeri CNTFET yapısının a) yandan görünümü b) üstten görünümü [26]  
(a) side view b) top view of MOSFET-like CNTFET structure)

voltajları  $V_{DD} = -V_{SS} = 0,3$  V olarak belirlenmiştir. CNTFET VDGA için kullanılan kutuplama akımları  $I_{BA}$ ,  $I_{BB}$ ,  $I_{BC} = 1$   $\mu$ A olarak alınmıştır.

**Tablo 1.** Seçilen CNTFET parametreleri ve değerleri [24]  
(Selected CNTFET parameters and values)

| Parametre                                                         | Değer  |
|-------------------------------------------------------------------|--------|
| Yüksek-k üst geçit dielektrik malzemesinin kalınlığı ( $T_{ox}$ ) | 4 nm   |
| Tüpün kiralitesi ( $n_1, n_2$ )                                   | (19,0) |
| Karbon Nanotüplerin Çapı ( $D_{CNT}$ )                            | 1,5 nm |
| Yüksek-k geçit oksit malzemesinin dielektrik sabiti ( $K_{ox}$ )  | 16     |
| Adım ( $S$ )                                                      | 20 nm  |
| Kanalın uzunluğu ( $L_{ch}$ )                                     | 32 nm  |
| Katkılı CNT kaynak uzantı bölgesinin uzunluğu ( $L_{ss}$ )        | 32 nm  |
| Katkılı CNT akaç uzantı bölgesinin uzunluğu ( $L_{dd}$ )          | 32 nm  |

**Tablo 2.** CNTFET VDGA için seçilmiş ve hesaplanmış değerler  
(Selected and calculated values for CNTFET VDGA)

| CNTFET               | W(nm) | Tüp Sayısı |
|----------------------|-------|------------|
| M1(A,B,C), M2(A,B,C) | 736   | 7          |
| M3(A,B,C), M4(A,B,C) | 1280  | 12         |
| M5(A,B,C)            | 320   | 3          |
| M6(A,B,C),-M9(A,B,C) | 960   | 9          |

Şekil 6'da farklı  $I_{BA}$  kutuplama akımında VDGA'nın  $v_p-v_n$  voltaj farkına karşı  $i_z$  akımının DC karakteristik eğrisi verilmiştir. Bu grafik elde edilirken  $I_{BB}$  ve  $I_{BC}$  kutuplama akımları 1  $\mu$ A olarak alınmıştır.  $I_{BA} = 1$   $\mu$ A kutuplama akımı ile elde edilen eğri incelendiğinde dikkate değer bir bozulma (distorsiyon) olmadan elde edilebilecek maksimum giriş voltajı yaklaşık olarak  $\pm 100$  mV tespit edilmiştir. Şekil 7 ve Şekil 8'de CNTFET VDGA'nın AC analizi verilmiştir. CNTFET'in tüp sayısı ( $N$ ), adım büyüklüğü ( $S$ ) ve kiralite değerleri ( $n_1, n_2$ ) değiştirilerek farklı kullanım amacı için gerekli olan değerler ayarlanabilmektedir [9]. Şekil 7'de farklı  $S$  değerlerinde  $v_p$  girişine gerilim uygulanıp  $i_z$  terminalindeki kazanç ölçülmüştür. Şekil 8'de ise farklı  $S$  değerlerinde  $v_z$  girişine gerilim uygulanmış ve  $i_w$  terminalinin kazancı ölçülmüştür. Buradan  $S=20$  için geçiş iletkenliği değerleri  $i_z/v_p$  ve  $i_w/v_z$  yaklaşık olarak 29,59  $\mu$ S olarak bulunmaktadır. Şekil 9'da yüksek empedans terminali  $z$ 'nin farklı  $S$  değerlerinde direnç değerleri verilmiştir. Ayrıca  $w$  terminalinin direnç değerleri, farklı  $S$

değerleri için yaklaşık olarak 24 K $\Omega$  - 36 K $\Omega$  aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

### 3.2. CNTFET VDGA'nın Filtre Uygulaması (Filter Application of CNTFET VDGA)

Şekil 10'da 3 girişli tek çıkışlı voltaj modlu VDGA filtre yapısı verilmiştir [21]. Bu filtre yapısı iki kapasitans ve iki CNTFET VDGA yapısından oluşmuştur ve Yüksek Geçiren (YG), Tüm Geçiren (TG), Alçak Geçiren (AG), Bant Geçiren (BG) ve Bant Durduran(BD) filtre özelliklerini sergilemektedir. Tablo 3'te, farklı filtre çıktıları için giriş voltajları verilmiştir. Filtre  $\pm 0,3$  V gibi düşük besleme voltajında çalışabilmektedir. Bu nedenle önerilen filtre yapısı düşük voltaj uygulamaları için uygundur. Devrenin  $V_{out}$  çıkış voltajı Eş. 6 ile hesaplanmaktadır.

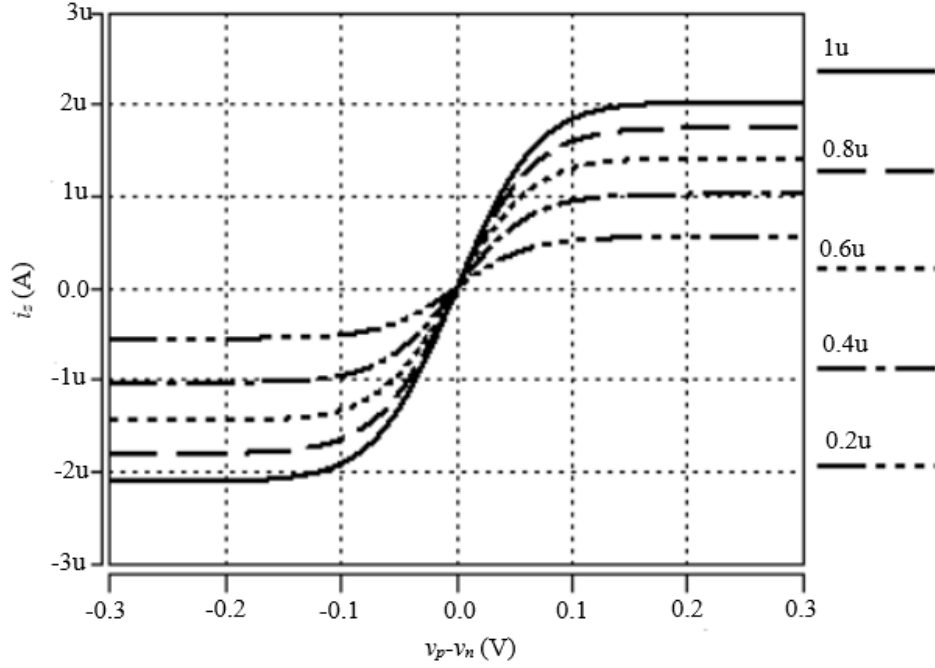
$$V_{out} = \frac{\beta_2 s^2 V_3 + \left( \frac{\beta_1 \beta_2 g_{m2}}{C_2} \right) s V_2 + \left( \frac{\beta_1 \beta_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right) V_1}{s^2 + \left( \frac{\beta_2 g_{m2}}{C_2} \right) s + \left( \frac{\beta_1 \beta_2 g_{m1} g_{m2}}{C_1 C_2} \right)} \quad (6)$$

Burada  $g_{m1}$  ve  $g_{m2}$  sırasıyla CNTFET VDGA1 ve CNTFET VDGA2'nin geçiş iletkenliği değerleridir.  $\beta_1$  ve  $\beta_2$  sırasıyla CNTFET VDGA1 ve CNTFET VDGA2'nin voltaj kazancı değerleridir. Açısal frekans ( $\omega_0$ ) ve kalite faktörü ( $Q$ ) sırasıyla Eş. 7 ve Eş. 8'de verilmiştir.

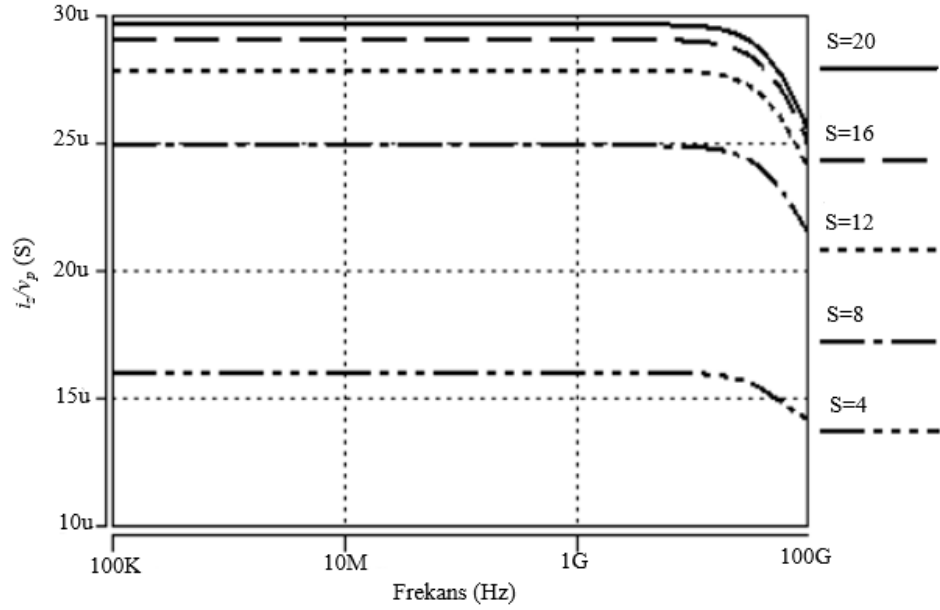
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g_{m1} g_{m2} g_{mB1} g_{mB2}}{g_{mC1} g_{mC2} C_1 C_2}} \quad (7)$$

$$Q = \sqrt{\frac{g_{m1} g_{mB1} g_{mC2} C_2}{g_{m2} g_{mC1} g_{mB2} C_1}} \quad (8)$$

Burada  $g_{mB1}$  ve  $g_{mB2}$  sırasıyla CNTFET VDGA1'in ve CNTFET VDGA2'nin ikinci geçiş iletkenliği hücresinin geçiş iletkenlik değerleridir.  $g_{mC1}$  ve  $g_{mC2}$  sırasıyla CNTFET VDGA1'in ve CNTFET VDGA2'nin üçüncü geçiş iletkenliği hücresinin geçiş iletkenlik değerleridir.  $g_{m1} = g_{m2} = g_m$ ,  $g_{mB1} = g_{mC2} = g_{mH}$ ,  $g_{mB2} = g_{mC1} = g_{mL}$  ve  $C1 = C2 = C$  olarak alınırsa  $\omega_0$  ve  $Q$  Eş. 9 ve Eş. 10 ile tespit edilebilir. Eş. 9'dan anlaşıldığı üzere açısal frekans değeri,  $g_m$  ve kapasitör değerlerinin değiştirilmesiyle ayarlanabilmektedir.



**Şekil 6.** Tasarlanan CNTFET VDGA'nın farklı  $I_{BA}$  kutuplama akımlarında  $v_p - v_n$  voltaj farkına karşı  $i_z$  akımının değişimi  
(Variation of  $i_z$  current versus  $v_p - v_n$  voltage difference at different  $I_{BA}$  bias currents of the designed CNTFET VDGA)



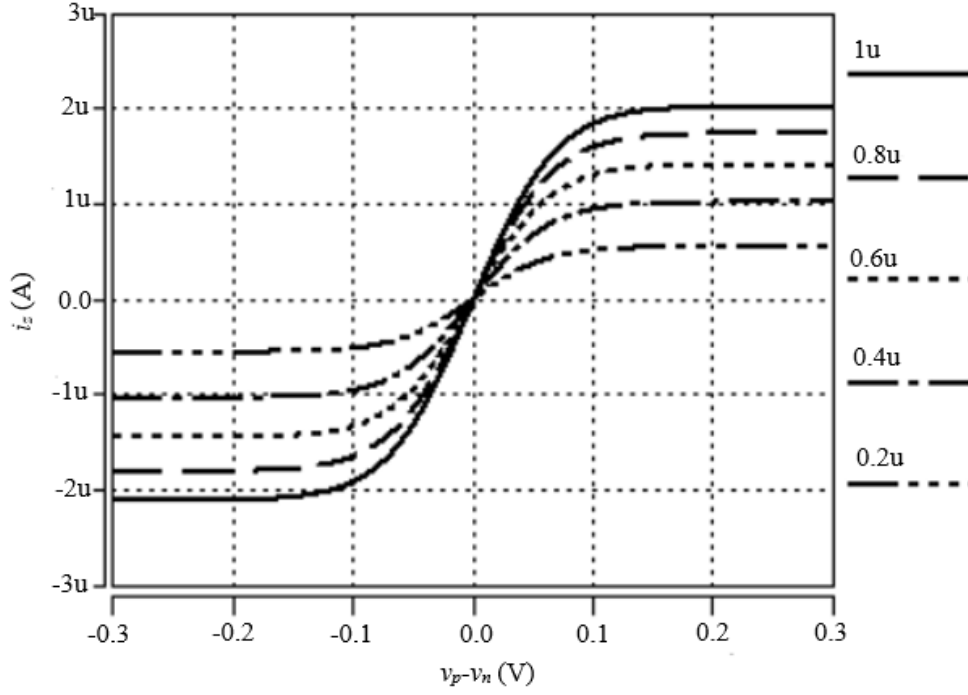
**Şekil 7.** Farklı  $S$  değerlerinde  $v_p$  girişine gerilim uygulandığında  $i_z$  akımının geçiş iletkenliği eğrisi  
(Transconductance curve of current  $i_z$  when voltage is applied to input  $v_p$  at different values of  $S$ )

$$w_0 = \frac{g_m}{C} \quad (9)$$

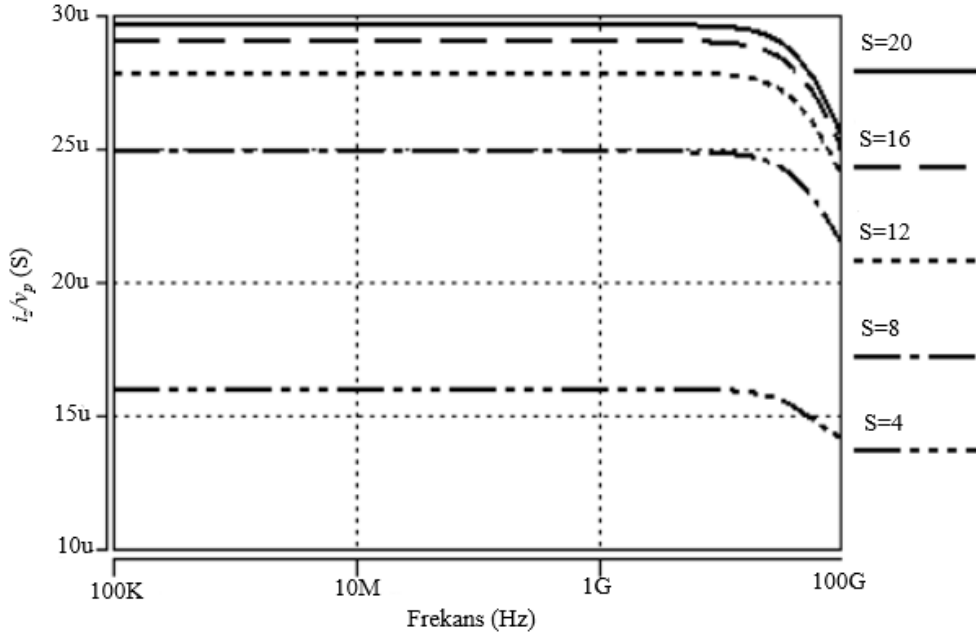
$$Q = \frac{g_{mH}}{g_{mL}} \quad (10)$$

Önerilen CNTFET VDGA filtre yapısında tüp sayısı tüm CNTFET'ler için  $N=21$  olarak alınmıştır.  $C_1$  ve  $C_2$  kapasitansları 0,1 pF olarak

seçilmiştir. Şekil 11'de YG, AG, BD ve BG filtre çıktıların genlik frekans cevabı gösterilmektedir. Şekil 12'de TG filtre için genlik frekans ve faz frekans cevabı verilmiştir. CMOS VDGA ile gerçekleştirilmiş filtre yapısında kutuplama akımı değerleri  $I_{BA}=I_{BB}=I_{BC}=40 \mu A$  ve  $C_1=C_2=20$  pF alınarak merkez frekansı 2,9 MHz olarak tespit edilirken CNTFET VDGA yapısı ile gerçekleştirilmiş filtre de kutuplama akımları  $I_{BA}=I_{BB}=I_{BC}=1 \mu A$  ve  $C_1=C_2=0,1$  pF alınarak merkez frekansı değeri yaklaşık olarak 22,909 MHz olarak tespit edilmiştir. Bu durum da yüksek frekanslı filtre



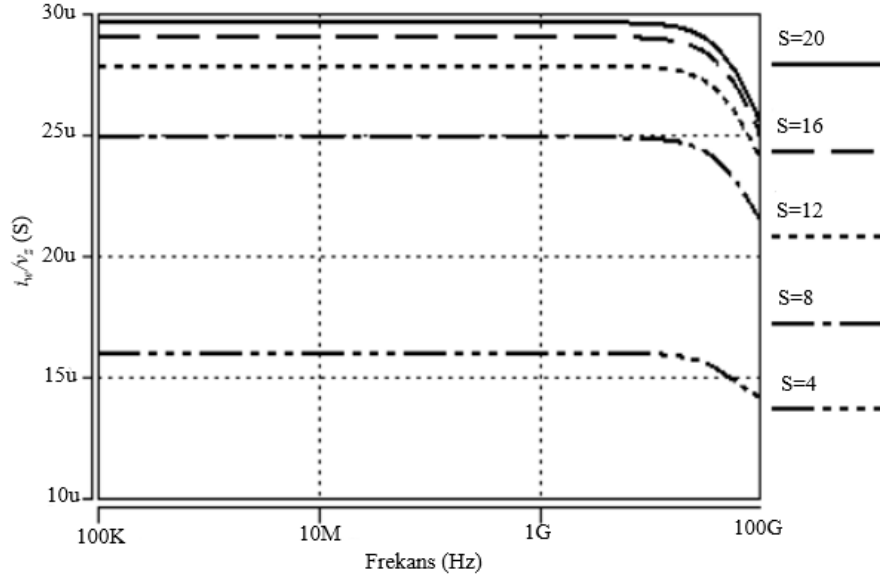
**Şekil 6.** Tasarlanan CNTFET VDGA'nın farklı  $I_{BA}$  kutuplama akımlarında  $v_p - v_n$  voltaj farkına karşı  $i_s$  akımının değişimi (Variation of  $i_s$  current versus  $v_p - v_n$  voltage difference at different  $I_{BA}$  bias currents of the designed CNTFET VDGA)



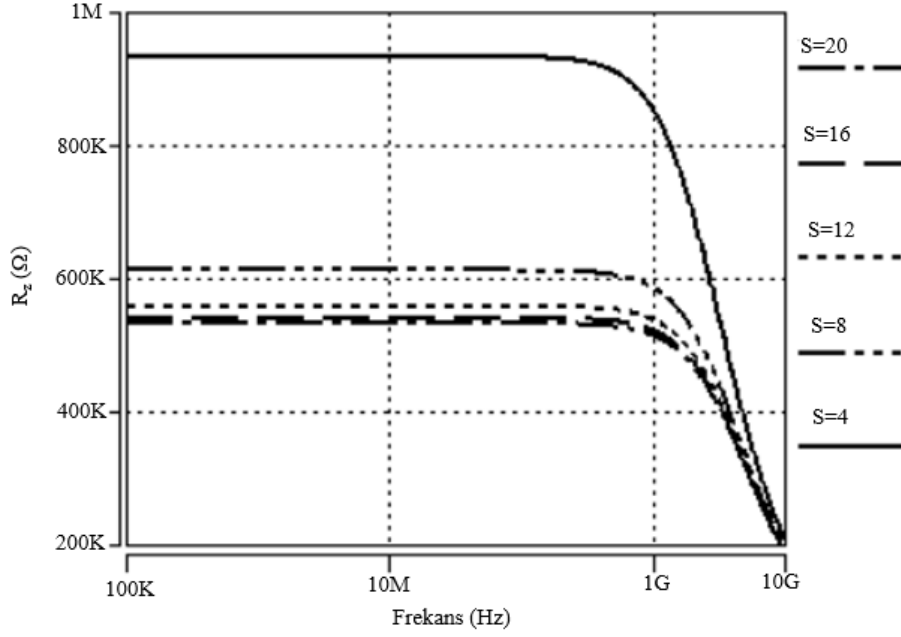
**Şekil 7.** Farklı  $S$  değerlerinde  $v_p$  girişine gerilim uygulandığında  $i_s$  akımının geçiş iletkenliği eğrisi (Transconductance curve of current  $i_s$  when voltage is applied to input  $v_p$  at different values of  $S$ )

uygulamaları için CNTFET VDGA filtre uygulamasını avantajlı hale getirmektedir. Şekil 13'de değişen  $I_{BA}$  kutuplama akımı değerlerinde bant geçiren filtre çıkışı verilmiştir. Farklı  $I_{BA}$  kutuplama akımları için merkez frekans değerlerinin yaklaşık olarak 5 MHz-23 MHz aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Buradan merkez frekansının kutuplama akımı ve kapasitör yardımıyla ayarlanabileceği tespit edilmiştir.

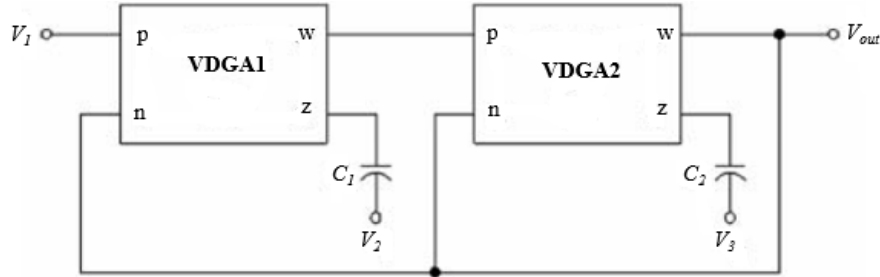
Tablo 4'de VDGA yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiş filtre yapıları karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada daha düşük besleme geriliminde daha düşük kutuplama akımıyla elde edilen filtre yapısının merkez frekansının CMOS ile gerçekleştirilen VDGA filtre yapılarına kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Daha önceden gerçekleştirilmiş CMOS VDGA yapısının tükettiği güç 2,18 mW olarak belirlenmişken, CNTFET VDGA filtre yapısının güç tüketimi 8,3412



**Şekil 8.** Farklı  $S$  değerlerinde  $v_z$  girişine gerilim uygulandığında  $i_w$  akımının geçiş iletkenliği eğrisi (Transconductance curve of current  $i_w$  when voltage is applied to input  $v_z$  at different values of  $S$ )



**Şekil 9.** Farklı  $S$  değerlerinde  $R_z$  direnci ( $R_z$  resistance at different  $S$  values)



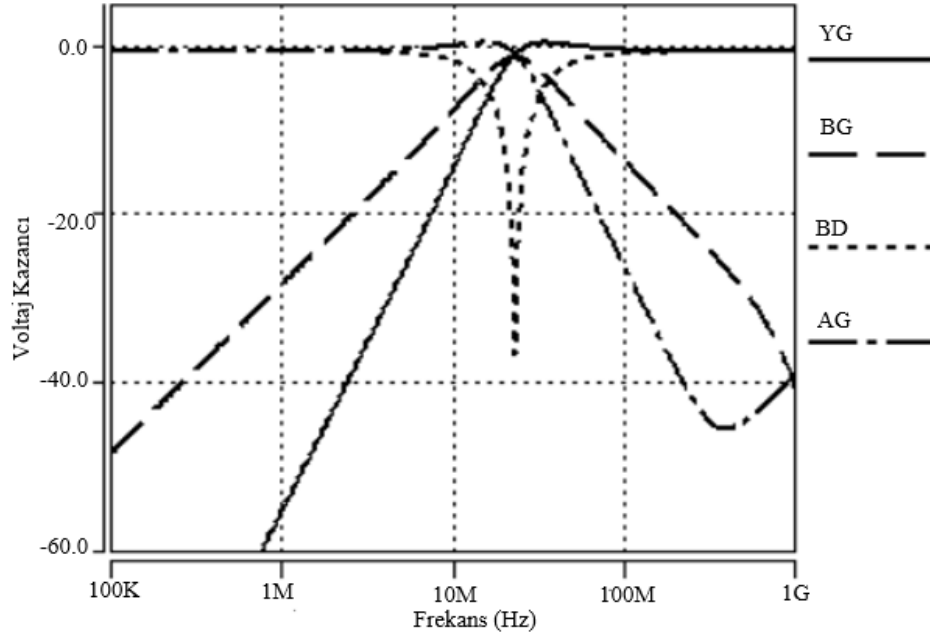
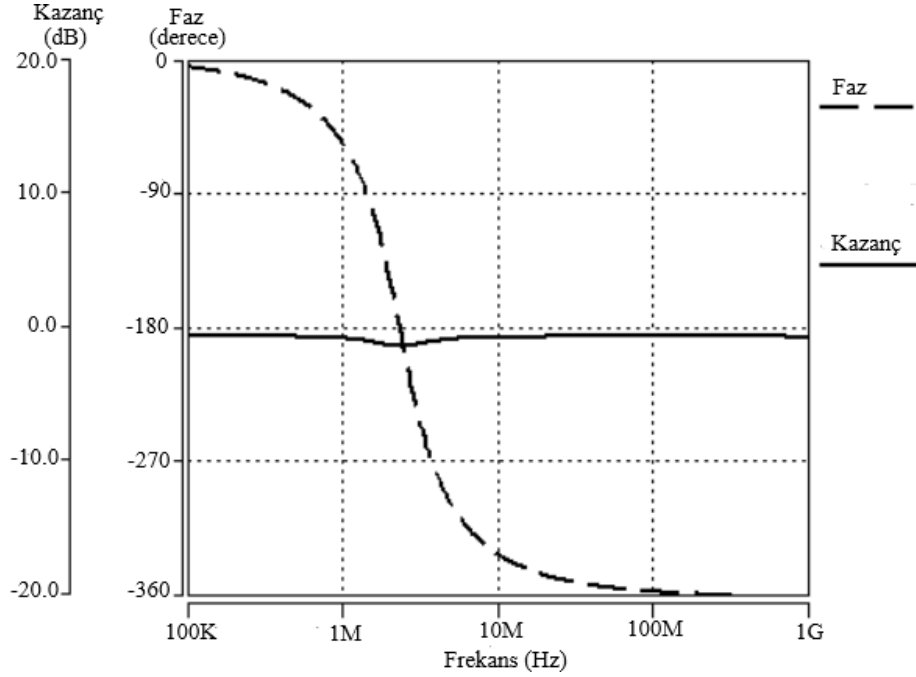
**Şekil 10.** CNTFET VDGA voltaj modlu filtre yapısı [22] (CNTFET VDGA voltage mode filter structure)

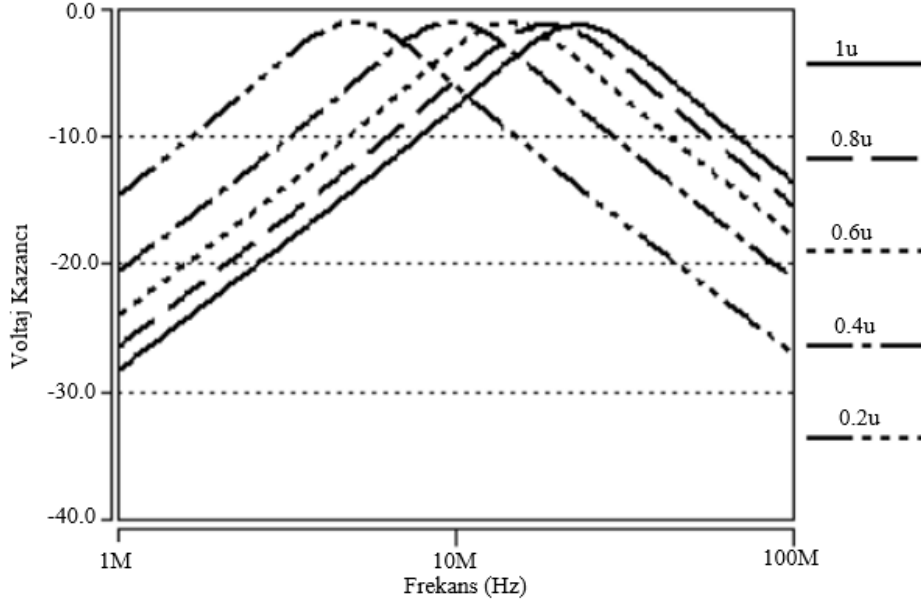
$\mu$ W olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan güç tüketimin yaklaşık 261 kat azaltıldığı sonucuna varılmıştır. CNTFET yapısının MOSFET

ve BJT ile kıyaslandığında henüz yaygın üretiminin bulunmaması bir dezavantaj olarak düşünülmektedir.

**Tablo 3.** Farklı Filtre Çıktıları için Giriş Voltajları (Input Voltages for Different Filter Outputs)

| Filtre Tipi | $V_1$    | $V_2$     | $V_3$    |
|-------------|----------|-----------|----------|
| AG          | $V_{in}$ | 0         | 0        |
| BG          | 0        | $V_{in}$  | 0        |
| YG          | 0        | 0         | $V_{in}$ |
| BD          | $V_{in}$ | 0         | $V_{in}$ |
| TG          | $V_{in}$ | $-V_{in}$ | $V_{in}$ |

**Şekil 11.** CNTFET VDGA filtre yapısının kazanç frekans eğrisi (Gain frequency curve of CNTFET VDGA filter structure)**Şekil 12.** Tüm geçiren filtrenin kazanç frekans ve faz frekans eğrisi (Gain frequency and phase frequency curve of all pass filter)



Şekil 13. Farklı IBA kutuplama akımı değerlerinde bant geçiren filtre cevabı (Band-pass filter response at different IBA bias current values)

Tablo 4. VDGA ile gerçekleştirilmiş filtre yapılarının karşılaştırılması (Comparison of filter structures realized with VDGA)

| VDGA Filtre            | Filtre Türü        | Teknoloji               | Kutuplama Akımı                                                                  | Güç Kaynağı         | Tüketilen Güç        | Merkez Frekansı |
|------------------------|--------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| CMOS [27]              | AG, YG, BG, TG, BD | TSMC 0.18 $\mu\text{m}$ | $I_{BA}=80 \mu\text{A}$<br>$I_{BB}=80 \mu\text{A}$<br>$I_{BC}=80 \mu\text{A}$    | $\pm 0,9\text{V}$   | 1,31 mW              | 3,18 MHz        |
| CMOS [28]              | YG, AG, BG         | TSMC 0.25 $\mu\text{m}$ | $I_{BA}=100 \mu\text{A}$<br>$I_{BB}=100 \mu\text{A}$<br>$I_{BC}=100 \mu\text{A}$ | $\pm 1\text{V}$     | 1,49 mW              | 1,59 MHz        |
| CMOS [29]              | YG, AG, BG         | 0.35 $\mu\text{m}$      | $I_{BA}=40 \mu\text{A}$<br>$I_{BB}=40 \mu\text{A}$<br>$I_{BC}=40 \mu\text{A}$    | $\pm 1,5 \text{ V}$ | 0,753 mW             | 6,05 MHz        |
| CMOS [21]              | AG, YG, BG, TG, BD | TSMC 0.35 $\mu\text{m}$ | $I_{BA}=40 \mu\text{A}$<br>$I_{BB}=40 \mu\text{A}$<br>$I_{BC}=40 \mu\text{A}$    | $\pm 1,5 \text{ V}$ | 2,18 mW              | 2,9 MHz         |
| CNTFET<br>[Bu çalışma] | AG, YG, BG, TG, BD | 32 nm                   | $I_{BA}=1 \mu\text{A}$<br>$I_{BB}=1 \mu\text{A}$<br>$I_{BC}=1 \mu\text{A}$       | $\pm 0,3 \text{ V}$ | 8,3412 $\mu\text{W}$ | 22,909 MHz      |

#### 4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada 32 nm CNTFET VDGA yapısının benzetim çalışmaları yapılmıştır. Besleme gerilimi  $\pm 0,3\text{V}$  ve kutuplama akımı  $1\mu\text{A}$  olarak alınmıştır. CNTFET VDGA yapısı, voltaj modlu üç giriş tek çıkış filtre yapısına uygulanmıştır. Daha düşük besleme gerilimi ve düşük kutuplama akımı değerlerinde CMOS VDGA yapısına kıyasla 22,909 MHz gibi daha yüksek merkez frekansı değeri elde edilmiştir. CNTFET VDGA filtre yapısının daha yüksek frekans gerektiren uygulamalar için uygun olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak CNTFET VDGA filtre yapısının güç tüketimi, CMOS VDGA filtre yapısının güç tüketimine kıyasla yüzlerce kat daha az olduğu tespit edilmiştir.

#### Kaynaklar (References)

- Bala, S., Khosla, M., Electrostatically doped tunnel CNTFET model for low-power VLSI circuit design, Journal of Computational Electronics, 17 16(4), 1528-1535, 2018.
- Zarandi, A. D., Reshadinezhad, M. R., Rubio, A., A systematic method to design efficient ternary high performance CNTFET-based logic cells, IEEE access, 8, 58585-58593, 2020.
- Obite, F., Ijeomah, G., Bassi, J. S., Carbon nanotube field effect transistors: toward future nanoscale electronics, International Journal of Computers and Applications, 41 (2), 149-164, 2019.
- Sachid, A. B., Chen, M. C., Hu, C., FinFET With High- $\kappa$  Spacers for Improved Drive Current, IEEE electron device letters, 37 (7), 835-838, 2016.
- Bala, S., Khosla, M., Design and simulation of nanoscale double-gate TFET/tunnel CNTFET, Journal of Semiconductors, 39 (4), 044001, 2018.
- Chiang, T. K., A new threshold voltage model for short-channel junctionless inverted T-shaped gate FETs (JLITFET), IEEE Transactions on Nanotechnology, 15 (3), 442-447, 2016.
- Prakash, P., Sundaram, K. M., Bennet, M. A., A review on carbon nanotube field effect transistors (CNTFETs) for ultra-low power applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89, 194-203, 2018.
- Sharma, T., Kumre, L., Energy-efficient ternary arithmetic logic unit design in CNTFET technology, Circuits, Systems, and Signal Processing, 39 (7), 3265-3288, 2020.

9. Masud, M., A'ain, A., Khan, I., & Husin, N., Design of voltage mode electronically tunable first order all pass filter in  $\pm 0.7$  V 16 nm CNFET technology, *Electronics*, 8 (1), 95, 2019.
10. Mamatov, I., Özçelep, Y., Kaçar, F., CNTFET based voltage differencing current conveyor low power and universal filter, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 110 (1), 127-137, 2022.
11. Yasir, M., Alam, N., Design of CNTFET-based CCII using gm/id technique for low-voltage and low-power applications. *Journal of Circuits, Systems and Computers*, 29 (09), 2050143, 2020.
12. Ercan, H., Tekin, S. A., Alçı, M., Voltage-and current-controlled high CMRR instrumentation amplifier using CMOS current conveyors, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 20 (4), 547-556, 2012.
13. Yadav, N., Rai, S. K., Pandey, R., High frequency electronically tunable floating memristor emulators employing VDGA and grounded capacitor, *Wireless Personal Communications*, 121 (4), 3185-3211, 2021.
14. Satansup, J., Tangsrirat, W., Single VDGA-based first-order allpass filter with electronically controllable passband gain, In 2015 7th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), IEEE, 106-109, 2015.
15. Channumsin, O., Tangsrirat, W., Compact electronically tunable quadrature oscillator using single voltage differencing gain amplifier (VDGA) and all grounded passive elements, *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 25 (4), 2686-2695, 2017.
16. Iijima, S., Helical microtubules of graphitic carbon. *nature*, 354 (6348), 56-58, 1991.
17. Seis M., Subaşı S., Maraşlı M., & Dehghanpour H., Investigation of mechanical and electrical properties of ultra-low rate SWCNT added UHPC, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 38 (1), 509-520, 2023.
18. Sinha, S. K., Chaudhury, S., Advantage of CNTFET characteristics over MOSFET to reduce leakage power, In 2014 2nd international conference on devices, circuits and systems (ICDCS), IEEE, 1-5, 2014.
19. Moaiyeri, M. H., Mirzaee, R. F., Navi, K., Hashemipour, O., Efficient CNTFET-based ternary full adder cells for nanoelectronics. *Nano-Micro Letters*, 3 (1), 43-50, 2011.
20. Martins-Júnior, P. A., Alcântara, C. E., Resende, R. R., Ferreira, A. J., Carbon nanotubes: directions and perspectives in oral regenerative medicine. *Journal of dental research*, 92 (7), 575-583, 2013.
21. Cen, M., Song, S., Cai, C., A high performance CNFET-based operational transconductance amplifier and its applications, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 91(3), 463-472, 2017.
22. Satansup, J., Tangsrirat, W., CMOS realization of voltage differencing gain amplifier (VDGA) and its application to biquad filter, *Indian Journal of Engineering and Material Sciences*, 20 (2013), 457-464, 2013.
23. Arbel, A. F., Goldminz, L., Output stage for current-mode feedback amplifiers, theory and applications, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2 (3), 243-255, 1992.
24. Lin, A., Wan, G., Deng, J., Wong, H. P., A quick user guide on Stanford university carbon nanotube field effect transistors (CNFET) HSPICE model V. 2.2. 1, 2008.
25. Imran, A., Hasan, M., Islam, A., Abbasi, S. A., Optimized design of a 32-nm CNFET-based low-power ultrawideband CCII, *IEEE transactions on Nanotechnology*, 11 (6), 1100-1109, 2012.
26. Zanjani, S. M. A., Dousti, M., Dolatshahi, M., A new low-power, universal, multi-mode Gm-C filter in CNTFET technology, *Microelectronics Journal*, 90, 342-352, 2019.
27. Roongmuanpha, N., Tangsrirat, W., Pukkalanun, T., Single VDGA-Based Mixed-Mode Universal Filter and Dual-Mode Quadrature Oscillator. *Sensors*, 22 (14), 5303, 2022.
28. Channumsin, O., Single VDGA-based dual-mode multifunction biquadratic filter and quadrature sinusoidal oscillator, *Informacije MIDEM*, 50 (2), 125-136, 2020.
29. Channumsin, O., & Tangsrirat, W., Dual-mode multifunction filter using VDGA's. In 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), IEEE, pp. 481-484., July, 2018.

