

그래핀이 결합된 인터디지털 커패시터의 전기적 특성분석

Analysis of Electrical Characteristics of Interdigital Capacitor with Graphenes

이 희 조

Hee-Jo Lee

요 약

본 논문에서는 마이크로대역에서 단층 및 다층 그래핀이 각각 결합된 인터디지털 커패시터의 전기적 특성을 비교 분석하였다. 그래핀이 결합된 커패시터의 등가회로에서 커패시터의 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 성분들 간 차이가 분명하게 나타났다. 특히 단층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 순수 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터에 비해 추가적으로 인덕턴스와 저항 성분이 나타났고, 또한, 커패시터 전극의 저항 성분이 증가하였다. 한편, 커패시터의 자기공명주파수는 더 낮은 주파수대역으로 이동하였고, 0.5~4 GHz 주파수 대역에서 투과특성이 상당히 향상되었다. 반면, 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 순수한 커패시터의 전기적 특성과 약간의 차이만 나타났다. 결과적으로 본 연구를 통해서 단층 그래핀이 다층 그래핀에 비해 인터디지털 커패시터의 전기적 특성과 성능에 더욱 민감한 영향을 줄 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the electrical characteristics of interdigital capacitor with single-layer and multi-layer graphene were compared and analyzed in the microwave region. In equivalent circuit, a capacitor coupled with graphene showed the clear difference in electrical components such as resistance, inductance, and capacitance. In particular, for the capacitor with single-layer graphene, additional inductance and resistance occurred and the electrode resistance was also increased. Meanwhile, the self-resonance frequency of capacitor was shifted toward lower frequency region and its transmitted characteristic was considerably improved at frequency ranging from 0.4 to 4 GHz. The electrical characteristics of the capacitor with multi-layer graphene were somewhat different than the bare capacitor. In conclusion, we could confirm that single-layer graphene greatly influenced the electrical characteristics and performances of interdigital capacitor compared to multi-layer graphene.

Key words: Graphene, Interdigital Capacitor, Self-Resonance Frequency, S-Parameter

I. 서 론

그래핀(graphene)은 벌집모양의 2차원 탄소구조를 갖는 가장 얇으면서 전기적^[1], 기계적^[2], 열적^[3] 특성이 매우 우수한 물질로서 알려져 있다. 이러한 그래핀의 우수한 물

성을 이용하여 그래핀 기반 무선바이오센서^[4], 고주파 전계효과트랜지스터(FET)^[5], 안테나^[6] 등과 같이 바이오 및 정보통신분야에 적용하려는 시도가 꾸준히 이루어져 왔다. 최근에 그래핀 기반 고주파 FET 소자의 경우 기존의 FET 소자의 차단주파수(cut-off frequency) 한계를 뛰어넘

「이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1C1A1A02037804).」
대구대학교 물리교육과(Department of Physics Education, Daegu University)

· Manuscript received October 16, 2015 ; Revised December 21, 2015 ; Accepted December 21, 2015. (ID No. 20151016-078)

· Corresponding Author: Hee-Jo Lee (e-mail: hjlee@daegu.ac.kr)

어 100 GHz 수준의 연구가 보고되었다. 이러한 능동소자의 성능향상은 훨씬 높은 고주파 대역의 시스템을 구현할 수 있는 가능성을 열게 되었다. 그러나 전반적인 고주파용 나노전자시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 능동소자(active devices)의 고주파 특성^[7]뿐만 아니라, 전송선로, 인덕터, 커패시터, 공진기 등과 같은 수동소자(passive devices)의 고주파 특성을 향상시킬 필요가 있다. 이러한 이유로 최근에 그래핀의 고주파 특성에 대한 연구로서 그래핀 선폭에 따른 전송파라미터 특성^[8], 그래핀 전기전도도 및 임피던스 특성^[9], 그래핀 도핑효과에 따른 저항 및 전송파라미터 특성^[10] 등의 연구가 활발히 진행되었다. 이러한 기초연구를 바탕으로 그래핀 기반 수동소자들의 특성에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 특히, 저주파 및 고주파영역에서 쉽게 구현할 수 있는 인터디지털 커패시터 소자는 탄소나노튜브^[11], 산화그래핀^[12]과 같은 탄소소재의 결합으로 바이오센서 소자로서 응용 가능성을 시사하였다. 기존의 두 탄소소재 결합의 경우 전극상의 원하는 위치의 결합과 패터닝 하기가 상당히 어려웠다. 반면, 그래핀의 경우, 전극상의 원하는 위치에 정확한 패터닝이 가능하다. 이것은 센서소자의 제작 측면에서 높은 재현성을 가질 수 있음을 시사한다. 이러한 장점을 이용하여 최근 그래핀을 결합한 인터디지털 커패시터 구조는 전하를 저장할 수 있는 커패시터의 자체의 저장능력과 전력 향상을 위한 연구^[13]와 인터디지털 커패시터와 마이크로스트립선상에 그래핀을 이용하여 가변 감쇠기에 적용한 연구^[14]가 보고된 바 있습니다.

본 연구는 센서소자로서 그래핀 기반 인터디지털 커패시터의 선행연구로서 단층 및 다층 그래핀을 결합시킬 때 커패시터의 전기적 특성변화를 비교 분석하고자 한다.

II. 소자설계 및 샘플 제작

2.1 인터디지털 커패시터 소자설계 및 특성

인터디지털 커패시터(interdigital capacitor) 소자는 금속-유전체-금속 형태의 주기적인 패턴으로 구성되어 있기 때문에 고주파 대역에서 쉽게 커패시턴스를 구현할 수 있는 소자이다. 그림 1과 같이 커패시터 소자를 동일평면에 2-포트 접지(G)-신호(S)-접지(G) 전극형태로 설계하였

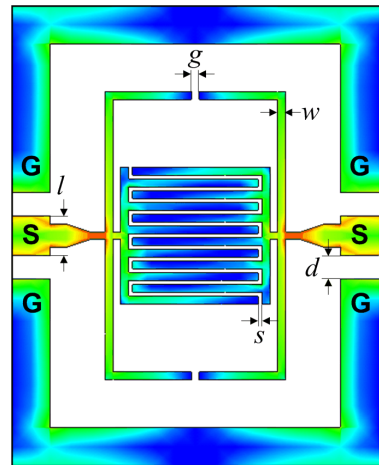


그림 1. 계산된 인터디지털 커패시터의 표면전류분포
 Fig. 1. Surface current distribution of simulated interdigital capacitor: $g=5 \mu\text{m}$, $w=20 \mu\text{m}$, $d=50 \mu\text{m}$, and $l=100 \mu\text{m}$.

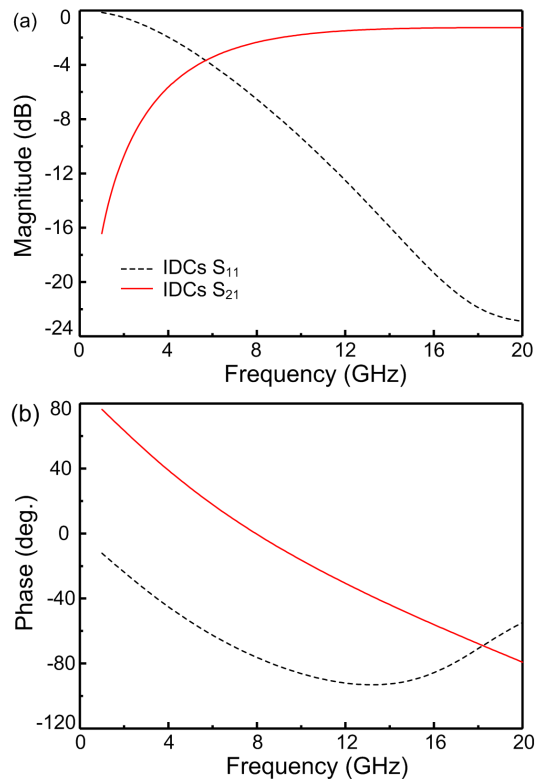


그림 2. 계산된 인터디지털 커패시터의 반사 및 투과 신호의 (a) 크기와 (b) 위상
 Fig. 2. (a) Magnitude and (b) phase of reflected and transmitted signal of simulated capacitor.

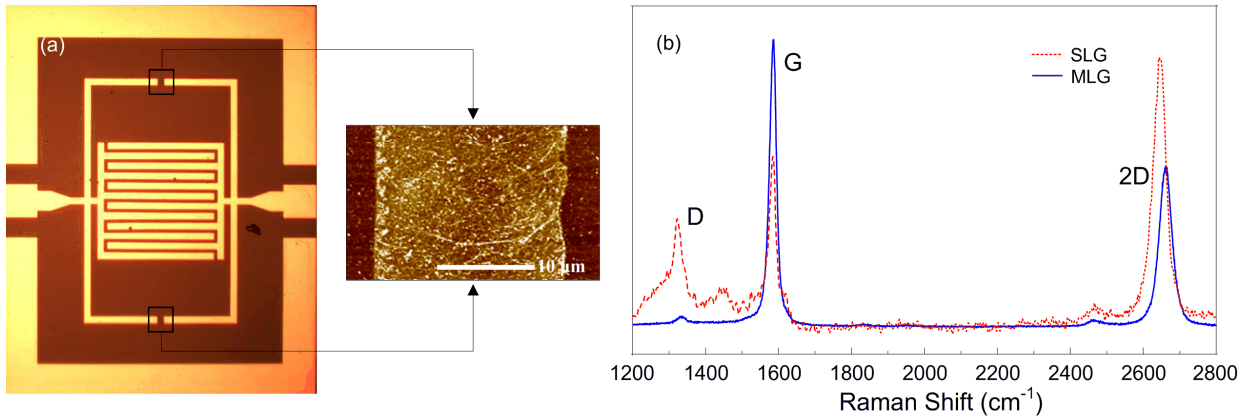


그림 3. (a) 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 샘플 사진과 (b) 성장된 그래핀의 라만 분광
 Fig. 3. (a) Sample photograph of capacitor with multi-layer graphene and (b) Raman spectroscopy of growth graphenes.

고, 모멘트법(moment method) 기반의 2.5D 전자기 시뮬레이터를 이용하여 고주파 특성을 예측하였다. 계산된 결과에 의하면 표면전류는 측정용 신호전극(S)과 선풍이 감소한 커패시터 전극에 집중되었고, 커패시터 상에 전류분포가 대칭적으로 나타났다. 이러한 전류분포는 커패시터 구조가 대칭적이고, 50 Ω 임피던스로 정합된 신호전극에서 커패시터 전극 폭의 감소에 따른 높은 임피던스 특성 때문이다. 제안한 커패시터는 물리적인 대칭성(symmetry)과 수동소자로서 상호성(reciprocity)을 갖기 때문에 그림 2와 같이 S-파라미터의 반사 및 투과 신호의 크기와 위상인 $S_{11}(=S_{22})$, $S_{21}(=S_{12})$ 와 $\theta_{11}(=\theta_{22})$, $\theta_{21}(=\theta_{12})$ 로 각각 나타낼 수 있다. 그림 2(a)는 계산된 커패시터의 S-파라미터의 크기를 나타낸 것이며, 주파수가 증가함에 따라 신호의 투과특성이 향상되는 전형적인 고주파 커패시터 특성을 나타내고 있다. 8 GHz 이후 대역에서는 -2 dB로 거의 일정한 투과특성을 가졌고, 이 주파수 부근에서 투과특성의 위상이 양에서 음으로 바뀌는 것을 그림 2(b)에서 확인할 수 있다.

2-2 그래핀 및 인터디지털 커패시터 샘플제작

그래핀 샘플제작의 경우, 구리와 코발트의 금속필름 상에 화학기상증착(chemical vapor deposition)법으로 단층 및 다층 그래핀을 각각 성장시켰고, 라만분광을 이용하여 그래핀 성장을 확인하였다. 성장된 그래핀 필름을 PMMA

로 처리한 후, FeCl₃ 용액으로 금속필름을 에칭하였다. PMMA/그래핀 필름을 DI 용액으로 세척한 후, SiO₂(~300 nm)/Si(~300 μm)의 고저항 기판상(≥ 13 kΩ cm)에 그래핀을 전사시켰다. 전사 후 PMMA를 아세톤 용액으로 제거하고, 리소그래피 방법으로 그래핀 패턴을 형성한 후, O₂ 플라즈마로 식각하였다. 식각된 그래핀상에 인터디지털 커패시터와 전극은 Ti, Al, Au 순서로 열증착 후, 리프트 오프(lift off) 공정으로 제작되었다^[10]. 최종적으로 그림 3(a)와 같이 샘플을 완성하였다. 샘플은 단층 및 다층 그래핀이 각각 결합된 커패시터와 그래핀 결합이 없는 순수한 커패시터 형태로 제작하였다. 그림 3(a)는 샘플 형태 중 다층 그래핀이 결합된 커패시터 소자의 광학적 이미지와 대략 4 nm 두께를 갖는 다층 그래핀의 AFM 이미지를 나타낸 것이다.

2-3 성장된 그래핀의 라만분석

그림 3(b)는 성장된 단층 및 다층 그래핀의 라만분광을 나타낸 것이며, 이러한 분광은 레이저광과 같은 단색광을 쬐었을 때 포논 진동수만큼의 차이가 있는 산란광을 측정하여 그래핀의 당김, 도핑과 결손 정도, 가장자리 모양, 층 수, 열전도 등을 분석할 수 있는 광학적 방법이다. 여기서 1,580 cm⁻¹ 부근의 G 피크(peak)는 흑연관련물질들에서 공통적으로 나타나는 피크이고, 1,350 cm⁻¹ 부근의 D 피크는 결손과 치환이 많이 된 구조물일수록 피크의 강

도가 크게 나타나며, $2,700\text{ cm}^{-1}$ 부근의 2D 피크는 $1,350\text{ cm}^{-1}$ 에너지를 갖는 포논에 의한 비탄성 산란이 2번 연이어서 발생할 경우 나타나는 피크에 해당된다^[15]. 성장된 단층 및 다층 그래핀의 라만분석결과, 다층 그래핀(multi-layer graphene)이 단층 그래핀(single-layer graphene)에 비해 G 피크가 상대적으로 높게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 다층 그래핀이 단층 그래핀에 비해 더 많은 흑연성분을 포함하고 있기 때문이다.

III. 측정 및 결과분석

3-1 샘플 측정

샘플측정을 위해 벡터망 분석기(vector network ana-

lyzer)와 연결된 RF 프로브 측정 장비를 사용하였다. 2-포트 SOLT(shot-open-load-thru) 방식으로 측정 시스템을 교정한 후, 각 샘플에 대한 S-파라미터를 얻었다. 그림 4는 측정한 S-파라미터의 크기와 위상을 나타낸 것이다. 기준 샘플인 순수한 커패시터(bare capacitor) 경우, 그림 2에서 예측한 것과 같이 비슷한 투과특성이 나타났다. 그림 4(a)의 단층 그래핀이 결합된 커패시터 경우, 순수한 커패시터에 비해 0.5 GHz에서 -9 dB의 투과특성이 나타나서 4 GHz 부근까지 더욱 향상되었다. 반면, 4 GHz 이후에는 오히려 순수한 커패시터에 비해 투과특성이 약간 낮아졌고, 이러한 특성은 그림 4(b)의 위상에서도 확인할 수 있다.

특히 낮은 주파수 대역에서 투과특성 향상은 단층 그

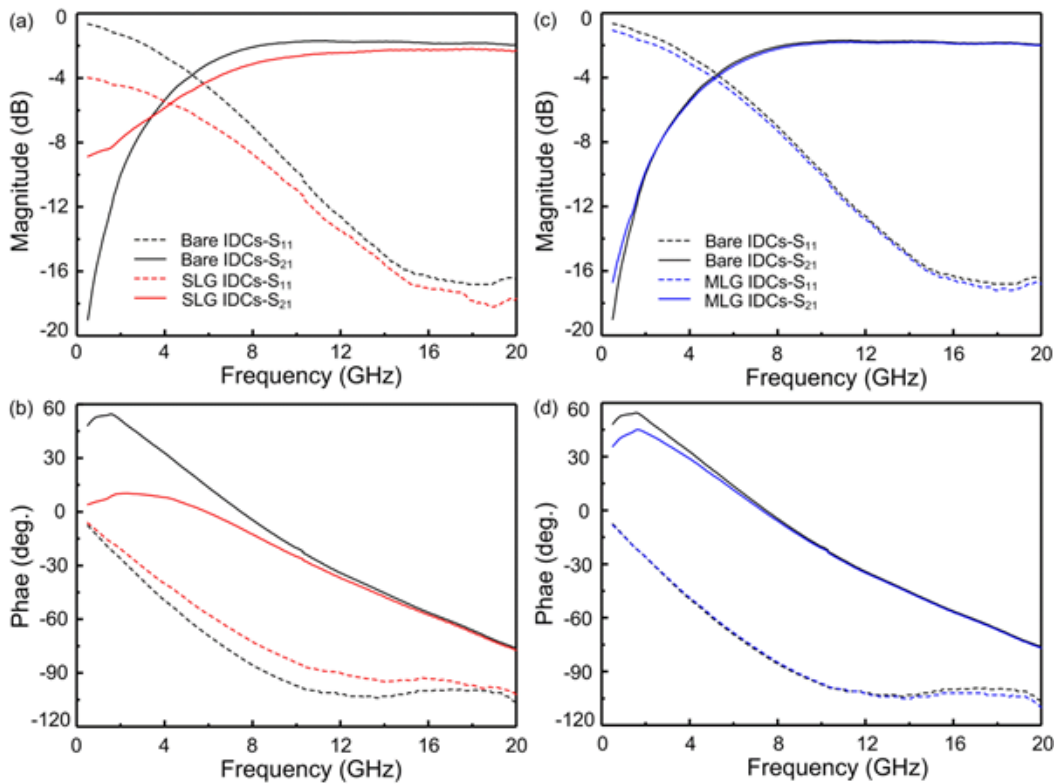


그림 4. 순수 커패시터와 그래핀이 결합된 커패시터 간 S-파라미터 특성비교; 단층 그래핀이 결합된 커패시터의 반사 및 투과 신호의 (a) 크기와 (b) 위상, 다층 그래핀의 결합된 커패시터의 반사 및 투과 신호의 (c) 크기와 (d) 위상

Fig. 4. Characteristic comparison of S-parameter between bare graphene and graphene-bonded capacitor; (a) magnitude and (b) phase of reflected and transmitted signal of capacitor with single-layer graphene, (c) magnitude and (d) phase of reflected and transmitted signal of capacitor with multi-layer graphene.

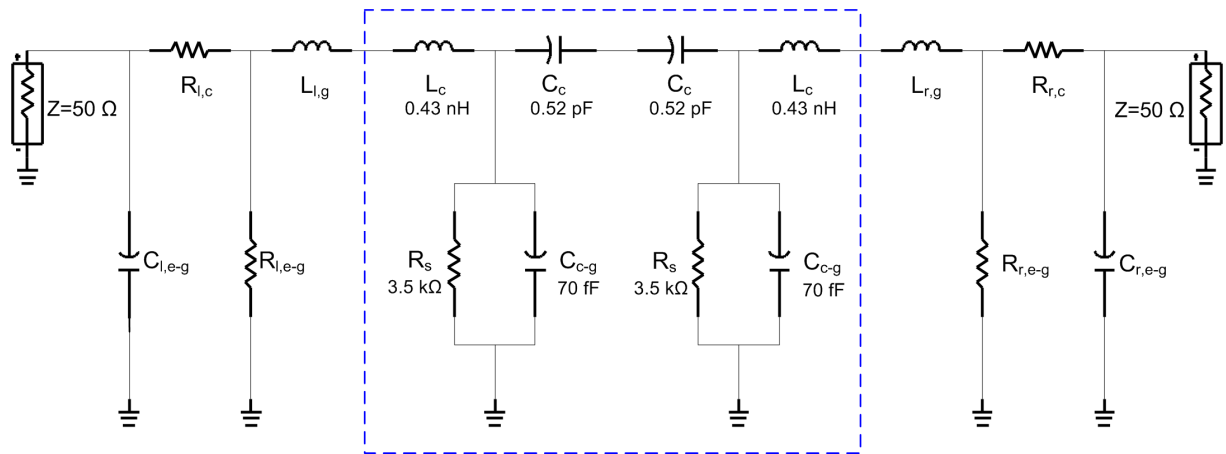


그림 5. 순수한 커패시터와 단층 및 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 등가회로
 Fig. 5. Equivalent circuit of bare capacitor and capacitor with single- and multi-layer graphene.

래핀이 4 nm 이상(~15층) 두께를 갖는 다층 그래핀에 비해 준 도체의 성질을 가지기 때문에 나타나는 현상으로 볼 수 있다⁹⁾. 그림 4(c)에서 다층 그래핀이 결합된 커패시터는 순수한 커패시터의 반사 및 투과특성과 거의 차이가 없었고, 그림 4(d)의 위상에서도 큰 차이가 없었다.

3-2 등가회로 구성

본 연구에서 그래핀 결합에 따른 인터디지털 커패시터의 전기적 특성분석을 위해 각 샘플에서 측정된 S-파라미터를 기반으로 그림 5와 같이 등가회로를 구성하였다. 등가회로에서 점선은 각 샘플의 공통된 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 성분을 나타낸다. L_c 와 C_c 는 커패시터 전극의 인덕턴스와 커패시턴스 성분을, R_s 는 고저항 실리콘 기판의 저항 성분을, C_{c-g} 는 커패시터 전극과 접지 전극 사이의 커패시터 성분을 각각 나타낸다. 한편, $R_{l,c}$ 와 $C_{l,e-g}$ 는 왼편 커패시터 전극의 저항성분과 그래핀이 결

합된 커패시터 전극사이의 커패시턴스 성분을, $L_{l,g}$ 와 $R_{l,e-g}$ 는 왼편의 그래핀 인덕턴스 성분과 그래핀과 접지 전극사이의 저항성분을 각각 나타낸다. 오른쪽에 있는 전기적 성분들 또한, 동일한 의미를 갖는다. 각 샘플의 등가회로에서 얻은 전기적 성분들을 표 1에 요약하였다.

3-3 등가회로 분석

순수한 커패시터의 경우, 왼편과 오른편의 커패시터 전극과 접지 전극사이의 커패시턴스 성분(C_{e-g})은 비대칭적인 값으로 나타났지만, 커패시터 전극의 저항성분(R_c)은 동일하게 나타났다. 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 순수한 커패시터에 비해 커패시터 전극 저항성분(R_c)과 그래핀이 결합된 커패시터 전극 사이의 커패시턴스 성분(C_{e-g})이 약간 증가하였다. 한편, 단층 그래핀이 결합된 커패시터는 순수한 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터에 비해 커패시터 전극의 저항성분(R_c)이

표 1. 각 샘플의 등가회로에서 추출한 전기적 성분들

Table 1. Electrical components extracted from equivalent circuit of each sample configuration.

샘플 형태 \ 성분	$R_{l,c}[\Omega]$	$L_{l,g}[\text{nH}]$	$C_{l,e-g}[\text{fF}]$	$R_{l,e-g}[\text{k}\Omega]$	$R_{r,c}[\Omega]$	$L_{r,g}[\text{nH}]$	$C_{r,e-g}[\text{fF}]$	$R_{r,e-g}[\text{k}\Omega]$
IDC	5.3	0	60	0	5.3	0	15	0
SLG-IDC	13	0.02	55	0.3	13	0.02	30	1
MLG-IDC	5.5	0	65	0	6.0	0	20	0

상당히 증가하였다. 또한, 그래핀과 접지전극 사이의 저항성분(R_{e-g})과 그래핀의 인덕턴스 성분(L_g)이 추가적으로 나타났다. 그래핀과 접지전극 사이의 저항성분(R_{e-g})의 경우, 비대칭적이지만 상당히 높은 저항 값을 가졌다. 이러한 저항성분은 커패시터 전극 사이에 결합된 단층 그래핀의 높은 접촉 저항성분 때문으로 볼 수 있다. 또한, 새롭게 형성된 그래핀 인덕턴스 성분의 경우 단층 그래핀이 탄소원자 수준의 얇은 두께(~ 0.3 nm)로 인해 전극 사이 접촉 저항성분이 상당히 커졌기 때문에 나타난 결과로 볼 수 있다. 커패시터 전극 사이의 그래핀과 접지전극 사이의 왼편 커패시턴스 성분은 순수한 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터에 비해 감소하였지만, 오른편 커패시턴스 성분은 증가하였다.

3.4 측정 및 등가회로의 커패시턴스 분석

측정한 샘플과 등가회로에서 얻은 S-파라미터를 이용하여 커패시터의 고주파 특성을 비교 분석하였다. 주파수에 따른 커패시턴스 특성은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다¹⁶⁾.

$$C = \frac{Im(Y_{ii})}{2\pi f} \quad (1)$$

$$Y_{ii} = \frac{(1 - S_{ii})(1 + S_{jj}) + S_{ij}S_{ji}}{Z_0(1 + S_{ii})(1 + S_{jj}) - S_{ij}S_{ji}}, \quad i = 1, j = 2 \quad (2)$$

여기서 i 는 1-포트, j 는 2-포트를 나타내고, Y_{ii} 은 신호의 반사특성에 대한 어드미턴스를 나타낸다. 그림 6은 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 각 샘플에 대한 커패시터의 고주파 특성을 나타낸 것이다. 순수한 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터 경우, 10.3 GHz에서 단층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우 9.95 GHz 부근에서 각각 자기공진 주파수가 나타났다. 이는 표 1에서 볼 수 있듯이, 단층 그래핀의 결합으로 새로운 인덕턴스 성분이 생겨났기 때문이다. 뿐만 아니라 단층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 순수한 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터에 비해 Q 특성이 감소되었고, 이러한 결과로 커패시터 특성에서 상당한 변형과 차이가 나타났다. 이는 표 1에서 볼 수 있듯이, 단층 및 다층 그래핀에 따라 왼편 및 오른편의

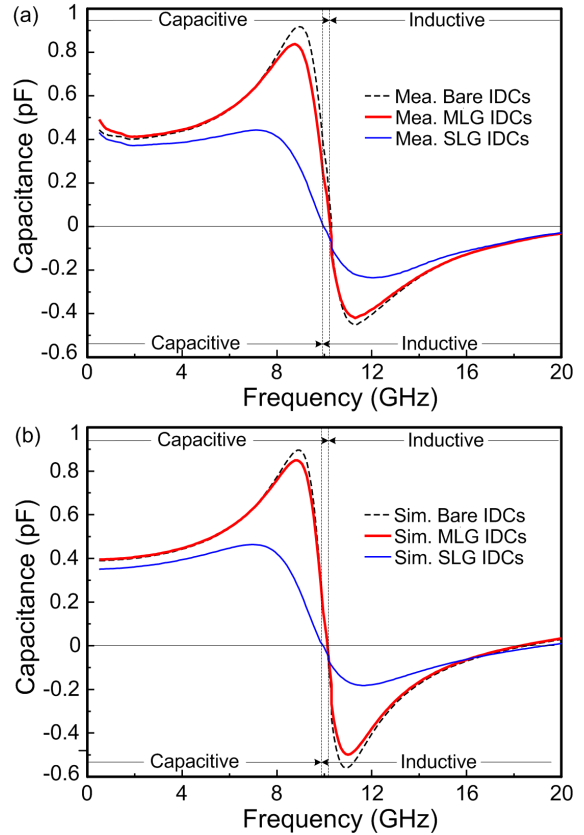


그림 6. (a) 측정한 각 샘플과 (b) 해당 등가회로에서 얻은 커패시터 특성

Fig. 6. IDC characteristics obtained from measured sample configuration and its equivalent circuit.

전극간 접촉저항인 $R_{i,c}$ 와 $R_{r,c}$ 의 값이 크게 달라졌기 때문이다. 반면 그림 6(a)와 6(b)에서 볼 수 있듯이, 순수한 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 자기공진 주파수는 큰 차이가 없었다.

IV. 결 론

순수한 커패시터와 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 커패시터의 전기적 특성에 큰 차이가 없었다. 다만 다층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 순수한 커패시터에 비해 커패시터 전극의 저항성분이 약간 증가되었다. 반면 단층 그래핀의 경우, 낮은 주파수 대역에서 순수한 커패시터에 비해 신호의 투과특성이 향상되었고, 단층 그

래핀이 커패시터와 결합될 때 커패시터 전극 사이의 접촉 저항성분이 새롭게 형성되었고, 비교적 큰 값으로 나타났다. 뿐만 아니라 단층 그래핀으로 인해 커패시터 상에 인덕턴스 성분이 추가적으로 형성되었고, 이는 단층 그래핀이 높은 전도성을 갖는 준 도체의 성질을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 각 샘플에서 얻은 커패시터의 고주파 특성을 비교 분석한 결과, 전기적 특성과 마찬가지로 순수한 커패시터와 다층 그래핀을 결합시킨 커패시터의 고주파 특성에 큰 차이가 없었다. 반면 단층 그래핀이 결합된 커패시터의 경우, 두 샘플 형태에 비해 커패시터의 Q 특성을 상당히 감소시킴을 확인하였다. 이는 향후 고주파용 그래핀 나노소자의 성능을 향상시키는데 단층 그래핀과 전극 사이의 접촉저항을 줄일 수 있는 전극연구가 중요한 역할을 할 것으로 기대되는 부분이다.

References

- [1] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, "The electric properties of graphene", *Rev. Mod. Phys.* vol. 81, no. 1, pp. 109-162, 2009.
- [2] I. W. Frank, D. M. Tanenbaum, A. M. van der Zande, and P. L. McEuen, "Mechanical properties of suspended graphene sheets", *J. Vac. Sci. Technol. B*, vol. 25, no. 6, pp. 2558-2561, 2007.
- [3] A. A. Balandin, S. Ghosh, W. Bao, I. Calizo, D. Teweldebrhan et al., "Superior thermal conductivity of single-layer graphene", *Nano Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 902-907, 2008.
- [4] M. S. Mannoor, H. Tao, J. D. Clayton, A. Sengupta, D. L. Kaplan et al., "Graphene based wireless bacteria detection on tooth enamel", *Nature Comm.*, vol. 3, no. 763, pp. 1-8, 2012.
- [5] Y. M. Lin, C. Dimitrakopoulos, K. A. Jenkins, D. B. Farmer, H. Y. Chiu et al., "100-GHz transistors from wafer-scale epitaxial graphene", *Science*, vol. 327, p. 662, 2010.
- [6] M. Dragoman, A. A. Muller, D. Dragoman, F. Cocchetti and R. Plana, "Terahertz antenna based on graphene", *J. Appl. Phys.*, vol. 107, no. 10, pp. 104313, 2010.
- [7] 임은재, 김형근, 양우석, 유찬세, "MOS 모델을 이용한 그래핀 트랜지스터 모델링", *한국전자과학회논문지*, 26 (9), p. 837-840, 2015년 9월.
- [8] H. -J. Lee, E. H. Kim, W. -J. Lee, and J. W. Jung, "RF transmission properties of graphene monolayers with width variation", *Phys. Status Solidi RRL*, vol. 6, no. 1, pp. 19-21, 2012.
- [9] H. -J. Lee, E. H. Kim, J. -G. Yook, and J. W. Jung, "Intrinsic characteristics of transmission line of graphenes at microwave frequencies", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 100, pp. 223102(1-3), 2012.
- [10] H. -J. Lee, E. H. Kim, J. H. Park, W. S. Song, K.-S. An, Y. S. Kim, J.-G. Yook, and J. W. Jung, "Radio-frequency characteristics of graphene monolayer via nitric acid doping", *Carbon*, vol. 78, pp. 532-539, 2014.
- [11] 이희조, 이현석, 유경화, 육종관, "인터디지털 커패시터 기반의 단일벽 탄소 나노 튜브를 이용한 바이오 물질 검출에 관한 연구", *한국전자과학회논문지*, 19 (8), pp. 891-898, 2008년 8월.
- [12] H. S. Yoon, J. Lim, S. U. Son, D. H. Kim, I. Song, and S. C. Jun, "Biotin-streptavidin detection with a graphene-oxide supported radio-frequency resonator", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 102, no. 19, pp. 193701(1-3), 2013.
- [13] Z. -S. Wu, K. Parvez, X. Feng, and K. Mullen, "Graphene-based in-plane micro-supercapacitors with high power and energy densities", *Nat. Commun.*, vol. 4, no. 2487, pp. 1-8, 2013.
- [14] L. Pierantoni, D. Mencarelli, M. Bozzi, R. Moro, and S. Bellucci, "Graphene-based electronically tunable microstrip attenuator", *Nanomater. Nanotechnol.*, vol. 4, no. 18, pp. 1-6, 2014.
- [15] 정현식, "그래핀의 광학적 분석-라만분광을 중심으로", *물리학과 첨단기술*, 18, pp. 20-25, 2009.
- [16] H. -J. Lee, H. -S. Lee, H. H. Choi, K. -H. Yoo, and J. -G. Yook, "An RF circuit model for interdigital capacitors-based carbon nanotube biosensors", *IEEE Trans. Nanotechnol.*, vol. 9, no. 6, pp. 682-686, 2010.

이 희 조



1998년 2월: 대구대학교 물리교육과 (이
학사)

2004년 2월: 연세대학교 물리 및 응용물
리학과 (이학석사)

2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학과
(공학박사)

2010년 3월~10월: 연세대학교 전기전자
공학부 BK21 박사후 연구원

2010년 11월~2012년 3월: 세종대학교 그래핀연구소 전임연구
원

2012년 4월~2013년 10월: 연세대학교 기계공학부 BK21 박사
후 연구원/융합기술연구원 연구교수

2013년 11월~2014년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 BK21 플
러스 연구교수

2014년 9월~현재: 대구대학교 물리교육과 조교수

[주 관심분야] RF 나노바이오센서 및 가스 센서, 탄소나노물
질의 RF 특성 및 회로모델링, 전자파와 생체물질간 상호작
용, 전자장/전자기 이론