creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

표면 플라즈몬 공명이 금속의 일함수를 바꾸는 실험적 발견

Observation of metal work function modulation by surface plasmon resonance

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

전기컴퓨터 공학부

심 혜 원

표면 플라즈몬 공명이 금속의 일함수를 바꾸는 실험적 발견

Observation of metal work function modulation by surface plasmon resonance

지도교수 박 영 준

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2015 년 2 월

서울대학교 대학원

전기컴퓨터 공학부

심 혜 원

심혜원의 공학석사 학위논문을 인준함

2015 년 2 월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

금 나노입자를 증착한 탄소 나노튜브 소자의 광 전기적 특성 변화를 실험적으로 발견함으로써 표면 플라즈몬 공명 현상에 의해 금 나노입자의 일함수가 변화한다는 것을 확인하고 해석하였다.

실험에서 사용된 소자는 소스와 드레인이 동심원 구조로 되어 있는 두 개의 금 전극 사이에 약 15 μm 길이의 채널을 가지는 구조이다. 채널은 반도체성 탄소 나노튜브 네트워크와 그래핀 두 가지로 준비하였고, 채널 위에 약 10 nm 의 지름을 갖는 금 나노입자가 랜덤하게 증착되어 있다. 소자의 소스와 드레인 양단에 0 V 혹은 DC bias 를 가한 상태에서 다양한 파장을 가지는 광원에 On/Off 펄스를 주면서 소스와 드레인의 전류 응답을 측정하였다. 이를 통해 빛에 의한 영향이 금 나노입자의 표면 플라즈몬 공명 현상에 의한 일함수 변조를 확인하였다.

실험적 관찰의 중요한 점을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 전류가 빛의 On/Off 에서만 일시적으로 흐르며 이는 보통의 광전 효과와는 다르다. 둘째, 금 나노입자가 있는 탄소 나노튜브 소자에서는 매우 큰 과도 전류가 흐르는데, 이에 비해 그래핀 소자에서는 작은 과도 전류가 흐른다. 셋째, 전류를 시간에 대해 적분한 충전/방전 전하의 크기는 빛의 파장에 따라서 크게 달라지는데, 기존에 알려진 금 나노입자의 표면 플라즈몬 공명 발생 정도와 일치한다. 넷째, 소스와 드레인의 전류는 단순한 충전/방전 전류가 아닌 단방향성 전류이다. 이같은 실험적 관찰로부터 소자의 광 전기적 응답이 단순한 광전 효과, 혹은 CMOS

이미지 센서 소자에서 발견되는 접합 충전/방전 효과가 아니라, 표면 플라즈몬 공명에 의한 일함수 변조로 해석할 수 있음을 보였다.

이러한 현상은 전기적 소자에서 처음으로 발견한 것이며, 표면 플라즈몬 공명에 의해서 변화하는 어떠한 효과를 감지하는 센서로 응용할 수 있다. 또한 본 실험에서 발견한 소스/드레인 루프를 통한 순환 전류 방향에 대해서는 이론적인 해석과 실험이 필요한 미래 연구 주제로 남겨둔다.

주요어 : 일함수, 표면 플라즈몬 공명, 금 나노입자, 쇼트키 접합

학 번 : 2013-20815

목 차

초 록 i

목 차 iii

표 목차 v

그림 목차 vi

제 1 장 서론 1

1.1 연구의 배경 1

1.2 연구의 목적 2

제 2 장 실험 설계 3

2.1 소자 구조 3

2.2 실험 시스템 5

2.3 실험 방법 6

제 3 장 결과 및 분석 7

3.1 빛에 대한 전류 응답 7

3.2 금 나노입자의 효과 12

3.3 광원 구동 조건에 따른 전류 응답 15

3.4 빛의 파장과 전류 응답의 상관 관계 23

3.5 전류 응답의 방향성 28
3.6 소자의 비대칭 구조에 대한 영향성 33
3.7 실험 결과 분석 37

제 4 장 결론 39

참고 문헌 40

Abstract 42

표 목차

표 3-1. 빛의 파장과 광자 에너지 및 빛의 세기 23

그림 목차

그림 2-1. 소자의 단면도 3
그림 2-2. 동심원 구조의 Source, Drain 금 전극 4
그림 2-3. GNP device의 회로 기호 4
그림 2-4. GNP device의 전기적 특성 측정 시스템 6
그림 3-1. GNP device에 빛을 비출 때 시간에 따른 전류 변화 8
그림 3-2. 광 다이오드에 빛을 비출 때 시간에 따른 전류 변화 8
그림 3-3. DC bias 조건과 전류 응답 간의 상관 관계 9
그림 3-4. 전류값을 시간에 대해 누적 적분한 전하량 11
그림 3-5. Source에서 측정한 빛에 대한 전하량 변화 11
그림 3-6. 탄소 나노튜브 채널 위의 금 나노입자 효과 13
그림 3-7. 그래핀 채널 위의 금 나노입자 효과 **오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.**
그림 3-8. 빛의 세기에 따른 전류 변화 16
그림 3-9. 빛의 세기와 전하량의 상관 관계 16
그림 3-10. 펄스 주파수에 따른 전류 변화 18
그림 3-11. 펄스 주파수와 전하량 간의 상관 관계 18
그림 3-12. 펄스 주파수에 따른 $I_{charging}$ 과 $I_{discharging}$ 차이 19
그림 3-13. 펄스 듀티비에 따른 전류 변화 21
그림 3-14. 펄스 듀티비와 전하량 간의 상관 관계 21
그림 3-15. 펄스 듀티비에 따른 $I_{charging}$ 과 $I_{discharging}$ 차이 22

그림 3-16. 빛의 파장에 따른 전류 변화 24
그림 3-17. (a) 정점의 전류값과 빛의 파장 간의 상관 관계
(b) 정점까지 도달하는 시간과 빛의 파장 간 상관 관계 26
그림 3-18. (a) 빛의 파장별 전류값을 시간에 대해 적분한 전하량 변화 . (b) 전하량 $Q_{charging}$, $Q_{discharging}$과 빛의 파장 간의 상관 관계 27
그림 3-19. Source, Drain 전극에서 흐르는 전류 측정 시스템 29
그림 3-20. Source와 Drain에서 각각 측정한 전류 변화..... 29
그림 3-21. 빛을 주었을 때 전류의 흐름을 예측한 방향..... 30
그림 3-22. 빛을 주었을 때 전류가 흐르는 실제 방향 31
그림 3-23. Source, Drain 두 전극을 묶은 회로..... 32
그림 3-24. Source와 Drain을 묶었을 때 I_{tied} 전류 응답 32
그림 3-25. Source와 Drain 간 대칭성에 따른 다이오드 효과 33
그림 3-26. 공기, 물, PBS 조건에서 I-V 특성 **오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.**
그림 3-27. 공기, 물, PBS 조건에서 시간에 따른 전류 변화**오류! 책갈피가 정의되어 있지 않습니다.**
그림 3-28. PBS 용액에서의 GNP device 등가 회로..... 35
그림 3-29. PBS 농도에 따른 I-V 특성 36
그림 3-30. PBS 농도에 따른 전류 변화..... 36
그림 3-31. 금 나노입자가 없는 소자의 에너지 밴드 다이어그램 38

그림 3-32. 금 나노입자가 있는 소자의 에너지 밴드 다이어그램 38

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

표면 플라즈몬 공명 (Surface Plasmon Resonance, SPR) 현상은 외부로부터 빛의 자극을 받았을 때 금속과 유전체의 경계면에서 금속 표면의 자유 전자들이 진동함으로써 발생한다. 입사하는 빛의 파장보다 훨씬 크기가 작은 금속 나노입자의 경우에는 주로 입자 구조 안에서 국소적으로 표면 플라즈몬 진동 (Oscillation) 이 발생하며, 이 현상은 국소 표면 플라즈몬 공명 (Localized Surface Plasmon Resonance, LSPR) 이라고 불린다 [1-2].

표면 플라즈몬 공명 현상은 가스 물질의 검출이나 바이오 센서 (Biosensor) 등 실용적인 기술에 적용하기 위해 다양한 연구 개발이 진행되어왔다 [3-6]. 주로 사용되는 표면 플라즈몬 공명 센서의 구조는 투명한 유리 프리즘 위에 얇은 금속 박막을 코팅한 후 빛을 입사하는 형태이며, 입사 각도에 따라서 박막 표면에서 흡수되거나 굴절되는 정도가 달라지게 된다. 이때 빛의 입사 각도나 물질의 굴절률 등 여러 가지 조건들을 고려해야 하며, 특정 물질을 구분해서 검출할 수 없기 때문에 이러한 광학적 기반의 측정 시스템은 한계가 있다 [7].

그러나, 전기적 기반의 표면 플라즈몬 공명 측정 시스템은 더 간단하고 비용 측면에서 효율적이다 [8]. 그러므로 광학적 기반 구조 대신에 전기적 기반의 실험 구조를 통하여 표면 플라즈몬 공명을 측정할 수 있다면 매우 의미있는 연구가 될 수 있다.

1.2 연구의 목적

전기적 기반의 표면 플라즈몬 공명 측정 시스템을 구성하기 위하여, 탄소 나노튜브 (Carbon nanotube, CNT) 위에 금 나노입자 (Gold nanoparticle, GNP) 를 증착한 소자 (device) 를 준비하고, 빛을 비추었을 때 소자에서 나타나는 전기적 반응을 관찰한다.

반도체성 (Semiconducting) 탄소 나노튜브와의 비교를 위해 대체물로서 그래핀 (Graphene) 필름을 이용하여 그 위에 금 나노입자를 증착한 소자에 대해서도 실험하였으나, 그래핀 소자의 전기적 반응이 매우 작게 나타나서 본 논문의 대부분은 탄소 나노튜브 소자를 이용한 실험 해석에 더 중점을 두고자 한다.

빛을 비추었을 때 소자에서 나타나는 반응은 일반적인 광 전기적 특성 변화와는 다르게 확인된다. 빛의 자극에 대한 독특한 반응과 관련하여 다양한 관점에서 실험을 하고 현상을 관찰함으로써 반응 메커니즘의 해석을 목적으로 한다.

본 연구를 통해서 전기적 기반 측정 시스템을 이용하여 표면 플라즈몬 공명에 의한 응답을 관찰할 수 있는지, 나아가 표면 플라즈몬 공명에서 기인하는 어떠한 효과를 감지할 수 있는 새로운 센서 기술로 적용할 수 있는지에 대해 가능성을 검토하고자 한다.

제 2 장 실험 설계

2.1 소자 구조

본 연구에서 사용한 소자는 실리콘 (Si) 기판에 1 μm 두께의 실리콘 산화막 (SiO_2) 이 있고, 그 위에 200 nm 두께의 금 (Au) 을 증착하여 전극으로 사용하는 구조이다. 금 전극 사이에는 탄소 나노튜브를 코팅하여 탄소 나노튜브 네트워크 (Carbon Nanotube Network, CNN) 를 만들거나 [9], 또는 얇은 그래핀 필름을 칩 (Chip) 위에 전사 (Transfer) 하여 채널을 형성한다 [10]. 가장 위에는 약 10 nm 의 지름을 갖는 금 나노입자를 증착했다. 소자의 수직 단면도를 **그림 2-1** 에 간략히 나타내었다.

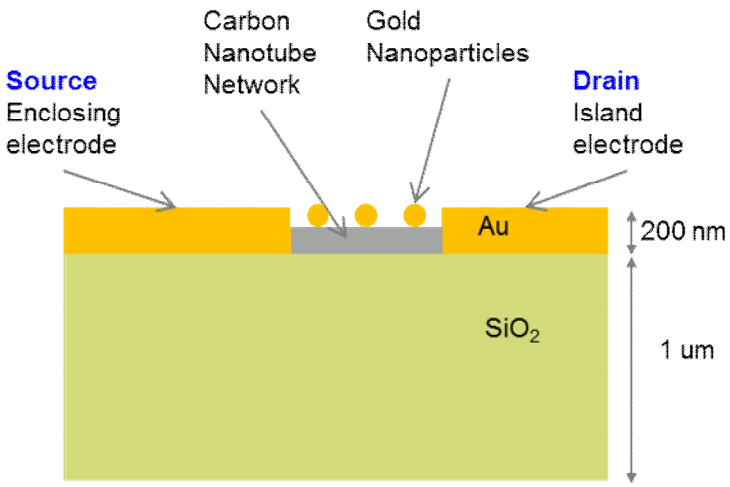


그림 2-1. 소자의 단면도

그림 2-2 에서 보는 것처럼 금 전극은 동심원 구조이고 가운데 위치한 섬 (Island) 전극 주위를 외부 (Enclosing) 전극이 둘러싸고 있는

형태이다. Island 전극은 지름 50 μm 인 원 모양이고 소스 (Source) 에 해당한다. 또한 Enclosing 전극은 Island 전극으로부터 일정한 간격만큼 떨어져 있는 200 x 150 μm 크기의 사각형 모양이고 드레인 (Drain) 에 해당한다. Source 와 Drain 사이에는 탄소 나노튜브 네트워크 채널 또는 그래핀 채널이 형성되어 있고 길이는 약 15 μm 이다.

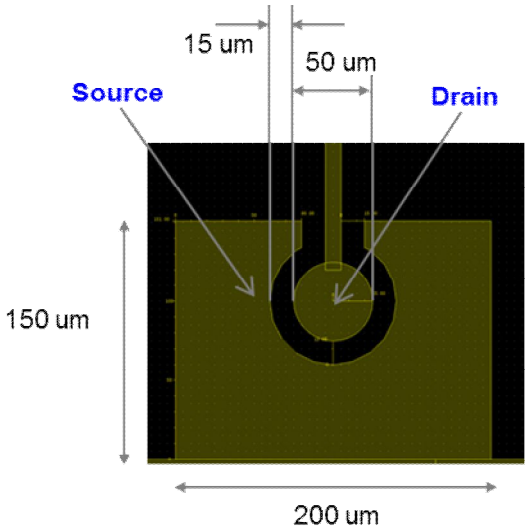


그림 2-2. 동심원 구조의 Source, Drain 금 전극

CNN device 위에 GNP 가 증착된 소자를 GNP device 라고 지칭하고 **그림 2-3** 과 같은 회로 기호 (Circuit symbol) 로 나타내고자 한다. Source 가 Drain 보다 면적이 더 크기 때문에 비대칭성 (Asymmetry) 구조를 표현하기 위해 Source 를 더 두꺼운 선으로 나타내었다.

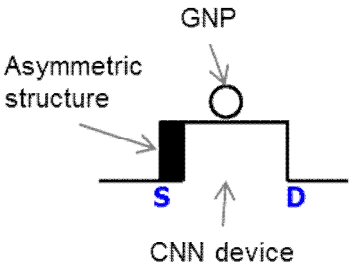


그림 2-3. GNP device의 회로 기호

2.2 실험 시스템

전압 펄스 (Pulse) 로 구동한 광원 (light source) 을 GNP device 에 비추어서 소자의 전기적 특성이 변하는 것을 관찰한다. 실험에서 사용한 광원은 레이저 (LASER) 및 LED (Light Emitting Diode) 이며 파장의 범위는 280 nm ~ 850 nm 이다. 함수 발생기 (Function Generator, Tektronix 사 AFG3021) 를 통해 지속적으로 반복되는 전압 펄스 (pulse-train) 를 만들어 냄으로써 빛을 켜거나 끈다.

GNP device 의 Drain 은 반도체 매개변수 분석기 (Semiconductor parameter analyzer, Hewlett-Packard 사 HP4145B) 또는 전원 공급 장치 (Power supply) 와 연결하여 직류 전원 (DC bias) 을 인가한다. 소자에 흐르는 전류는 Source 에 연결된 전치 증폭기 (Preamplifier, Stanford Research Systems 사 SR570) 를 거쳐서 10 μA/V의 민감도 (Sensitivity) 를 갖고 전압 신호로 증폭이 된다. 이어서 Preamplifier 에 연결된 디지털 오실로스코프 (Digital Oscilloscope, Tektronix 사 TDS3032B) 를 통해 전압을 측정하는데, 데이터 산포에 의한 잡음 (noise) 을 최소화 하고자 오실로스코프에 내장된 평균 함수 기능을 사용하여 512개 신호의 평균값을 얻었다.

위의 시스템은 Source 의 전류를 측정하는 방법이고, Drain 의 전류를 측정하기 위해서는 두 전극의 위치를 서로 바꾸어서 실험한다. 전체적인 측정 시스템 구성을 **그림 2-4** 에 나타내었다.

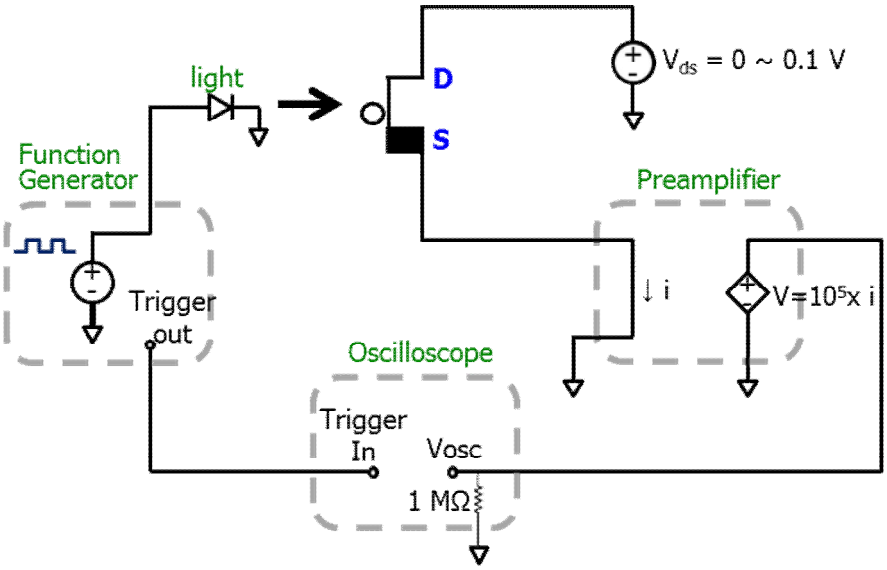


그림 2-4. GNP device의 전기적 특성 측정 시스템

2.3 실험 방법

외부 전원에 대한 광원의 반응 속도 및 빛에 대한 GNP device 의 응답 속도를 고려하여 펄스의 동작 조건을 조절하였다. 소자에 빛을 비추면 내부의 전기적 특성이 변화하기 때문에 여러 가지 실험 조건에 대해서 시간에 따른 전류값을 관찰할 수 있다. ① 빛을 켜거나 끌 때 나타나는 전류 신호를 분석하였으며, ② 빛의 세기에 대한 전류 변화를 확인하였다. ③ 다양한 빛의 파장에 대한 전기적 특성 차이를 비교하였고, ④ Drain 과 Source 에서 각각 전기적 특성을 확인함으로써 전류의 방향을 분석하였다. ⑤ 전해질 용액 조건에서의 전류 변화를 관찰하였으며, ⑥ 펄스 주파수 및 듀티 비 (Duty ratio) 에 대한 전류값을 측정하였다.

제 3 장 결과 및 분석

3.1 빛에 대한 전류 응답

GNP device 는 **그림 3-1** 과 같이 빛에 대해서 독특한 전류 응답을 나타낸다. 광원을 1 kHz, Duty ratio 50 %로 동작시켜서 소자에 비추었을 때, 시간에 따라 변하는 전류 응답이며, 그래프 윗부분에 표시한 선은 빛이 켜진 구간과 꺼진 구간을 보여준다. GNP device 에 빛을 비추는 동안에는 전류 응답이 계속해서 나타나는 것이 아니라, 단지 빛을 켠 후 수십 μs 이내의 전이 상태 (Transition) 에서만 순간적으로 반응이 나타나고 이후에는 전류가 거의 흐르지 않는다. 또한 빛을 끌 때에도 Transition 상태에서만 반응이 나타나며 정점 (Peak) 에 도달한 이후에는 전류가 점차 감소하고 있다.

GNP device 실험과 동일한 방식으로 광원을 동작시키고 GNP device 대신 광 다이오드 (Photodiode) 를 연결하여 시간에 따른 전류 응답을 측정하면 **그림 3-2** 와 같다. 광 다이오드에 빛을 비추는 동안에는 지속적으로 일정한 전류가 흐르다가 빛을 끄면 곧바로 전류가 흐르지 않는다. 광 소자에 대한 기존 연구 결과에 따르면, 적외선 (Infrared) 영역에서 탄소 나노튜브 필름의 광 전도성 (Photoconductivity) 이 관찰되었다 [11-14]. 그리고 금속 나노 구조 (Nanostructure) 의 광 소자는 광 변환 효율 (Photo-conversion efficiency) 을 높일 수 있다 [15-17]. 이러한 결과는 electron – hole pair generation 에서 기인하는 반응이다.

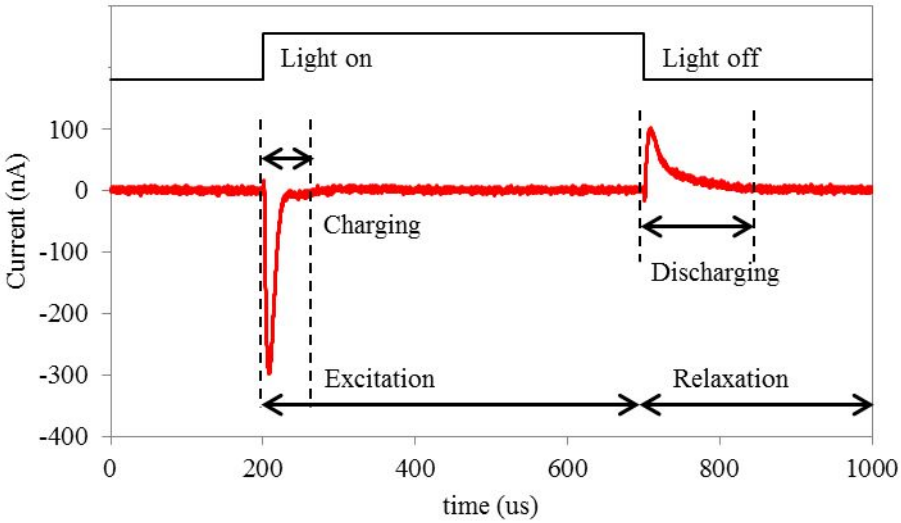


그림 3-1. GNP device에 빛을 비출 때 시간에 따른 전류 변화

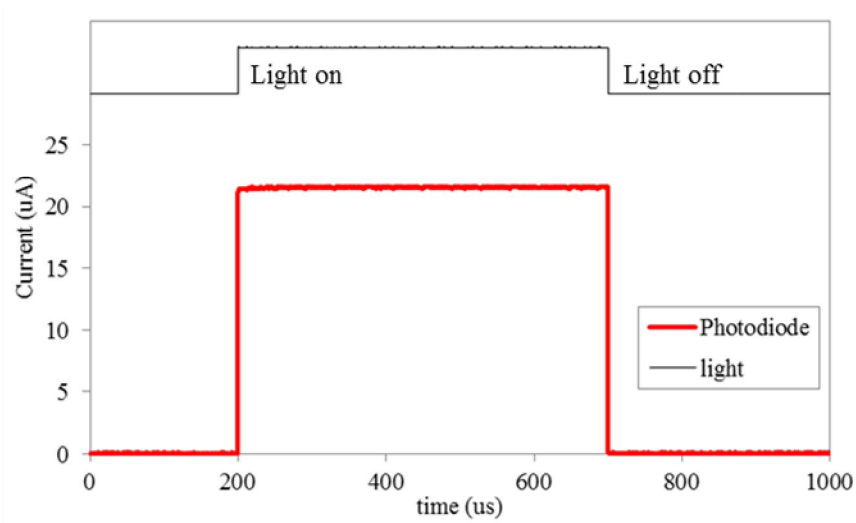


그림 3-2. 광 다이오드에 빛을 비출 때 시간에 따른 전류 변화

GNP device 는 광 다이오드와는 다르게 빛을 비추면 전류 응답이 일시적으로 나타나는 것으로 보아 electron – hole pair generation 을 통해 현상을 설명하지 못한다. 또한 **그림 3-3** 에서 보는 것처럼 DC bias 조건을 0 V ~ 0.1 V 로 바꾸어도 모두 동일한 결과를 나타내고 있다. 그러므로 GNP device 의 빛에 대한 반응은 DC bias 조건과 무관하며, 탄소 나노튜브 채널에서 electron 이나 hole 의 이동도 (mobility) 가 변하지 않는다고 말할 수 있다.

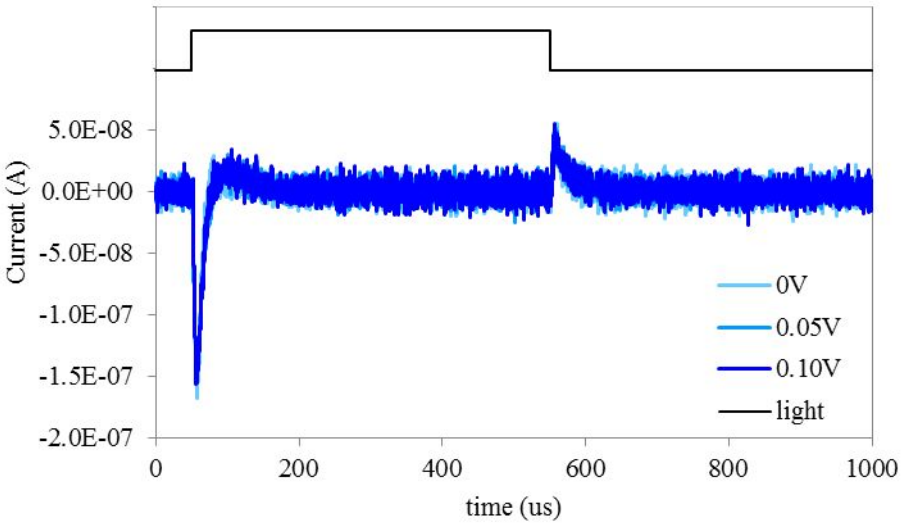


그림 3－3. DC bias 조건과 전류 응답 간의 상관 관계

빛이 켜지는 순간과 빛이 꺼지는 순간의 전류는 서로 반대의 부호로 나타났다. 빛을 켰을 때는 음 (negative) 의 전류가 측정되는데 이것은 측정 장비에서 나가는 방향, 즉 Preamplifier 에서 GNP device 의 Source 방향으로 전류가 흐른다는 것을 의미한다. 반면에 빛을 끌 때는 양 (positive) 의 전류가 측정되는데 이것은 측정 장비로 들어오는 방향, 즉 Source 로부터 Preamplifier 방향으로 전류가 흐른다는 것을 의미한다.

그림 3-1 에 나타낸 것처럼 GNP device 에 빛을 비추면 여기 상태 (Excitation state) 에서 충전 전류 (Charging current) 가 흐르다가 빛을 끄면 이완 상태 (Relaxation state) 에서 방전 전류 (Discharging current) 가 흐른다. 이는 excitation 상태일 때는 금 나노입자와 탄소 나노튜브 사이의 쇼트키 접합 (Schottky junction) 에 전하 (Electric charge) 가 쌓였다가 relaxation 상태일 때는 전하가 방전되는 것으로 보인다.

GNP device 응답 속도는 excitation 상태와 relaxation 상태 간에 서로 차이가 있는데, 충전 전류가 흐르는 시간에 비해 방전 전류가 흐르는 시간이 훨씬 길게 나타났다. 각각의 전류 응답을 다시 세부적으로 구분하여 ① 펄스가 인가된 후 정점에 도달하기까지의 구간, ② 정점 이후에 전류가 감소하면서 거의 흐르지 않을 때까지의 구간으로 나누어서 살펴보았다. 첫번째 구간, 펄스가 인가된 후 정점에 도달하기까지의 시간은 빛을 켰을 때와 빛을 끌 때 모두 동일하게 나타난다. 그러나 두번째 구간, 정점 이후에 전류가 감소하는 시간의 경우에는 충전 전류의 감소 속도가 방전 전류의 감소 속도보다 3~4배 빠르게 나타났다. 두번째 구간에 대한 RC 시간 상수 (time constant, τ) 를 비교하면 충전될 때의 시간 상수 (11 μs) 가 방전될 때의 시간 상수 (27 μs) 보다 작으므로 더 빠른 응답이 나타난다.

소자의 응답은 전류 방향과 속도뿐만 아니라 전류값에서도 차이가 난다. 빛을 켰을 때에는 정점의 전류값이 약 -300 nA, 빛을 끌 때에는 약 100 nA 로 충전 전류의 정점값이 더 크다. 소자에 쌓이거나 방전되는 총 전하량 (the amount of charge) 을 비교하고자 그림 3-1 의 전류값을 시간에 대해서 누적 적분 (Cumulative integration) 하면 **그림 3-4** 와 같은 결과를 얻을 수 있다.

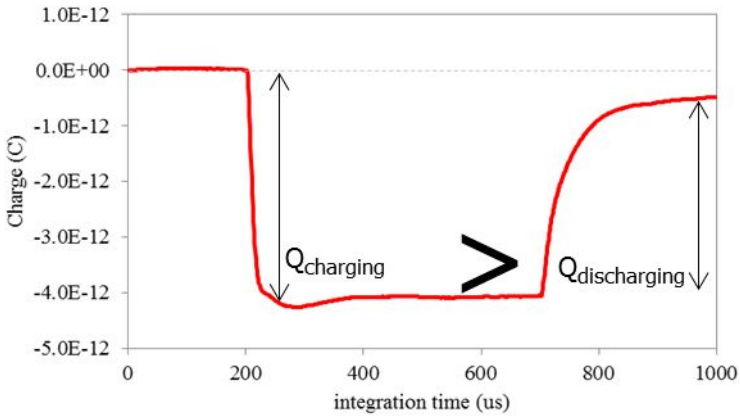


그림 3－4. 전류값을 시간에 대해 누적 적분한 전하량

빛을 켰을 때 흐르는 전하량 $Q_{charging}$ 은 -4.19 pC, 빛을 껐을 때 흐르는 전하량 $Q_{discharging}$ 은 3.45 pC 으로 충전 전하량이 방전 전하량보다 항상 크게 나타났다. 빛에 대한 전류의 방향과 전하량 차이에 대한 개념도를 **그림 3-5** 에 보여주고 있다.

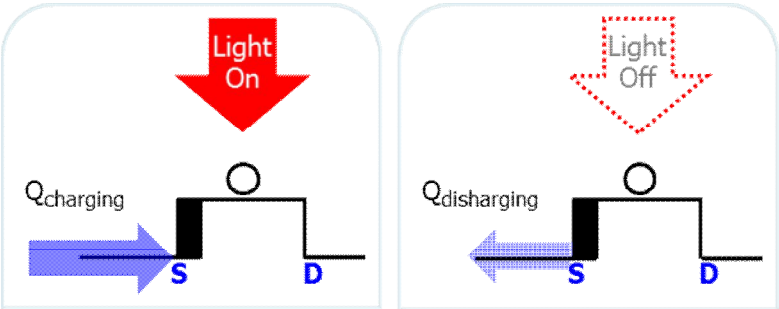


그림 3－5. Source에서 측정한 빛에 대한 전하량 변화
: $Q_{charging}$, $Q_{discharging}$

3.2 금 나노입자의 효과

금 나노입자가 전류 응답에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위해서 탄소 나노튜브 네트워크 채널 위에 금 나노입자를 증착한 소자 (GNP device) 와 금 나노입자를 증착하지 않은 소자 (CNN device) 를 비교하였다. CNN device 에서는 탄소 나노튜브와 금 전극 사이의 쇼트키 접합만 존재하고, GNP device 에서는 탄소 나노튜브와 금 전극 및 금 나노입자 사이의 쇼트키 접합이 존재한다.

그림 3-6 (a)는 한 주기 1 ms 동안 빛을 켰을 때와 껐을 때 나타나는 전류 응답이고 그림 3-6 (b)는 0.2 ms 동안 빛을 켰을 때 나타나는 전류 응답을 측정한 값이다. CNN device 와 GNP device 는 동일한 방향으로 전류 응답이 나타나고 있다. 그런데 CNN device 의 최대 전류값은 -50 nA 에 불과하지만, GNP device 의 최대 전류값은 -190 nA 로 3배 이상 크게 나타난다. 응답 시간 관점에서는 CNN device 와 GNP device 모두 동일하게 나타나므로 금 나노입자의 유무에 따라서 전류 응답 시간에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

반도체 성질을 띠는 탄소 나노튜브 대신에 금속성을 가진 그래핀을 사용하여 금 나노입자의 효과를 비교하였다. **그림 3-7** (a) 에서는 그래핀 채널 위에 금 나노입자의 유무에 대해 눈에 띄는 차이를 보이지 않는다. 그림 3-7 (b) 와 같이 위의 네 가지 소자를 함께 비교하면 탄소 나노튜브 소자에서만 금 나노입자가 중요한 효과를 나타내는 것으로 보인다. 그러므로 본 연구에서는 탄소 나노튜브 채널의 GNP device 에 초점을 맞춘다.

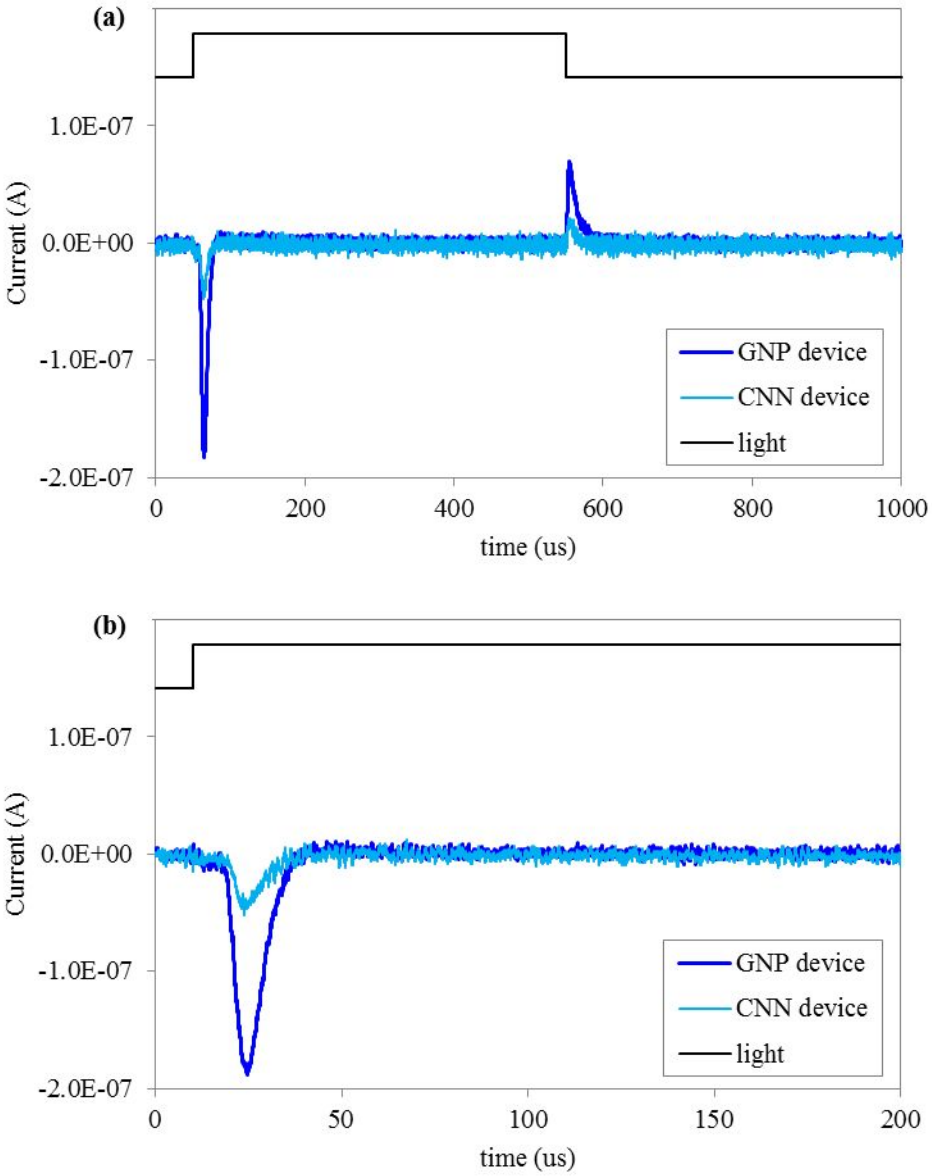


그림 3-6. 탄소 나노튜브 채널 위의 금 나노입자 효과
(a) 1 ms : excitation and relaxation, (b) 0.2 ms : excitation

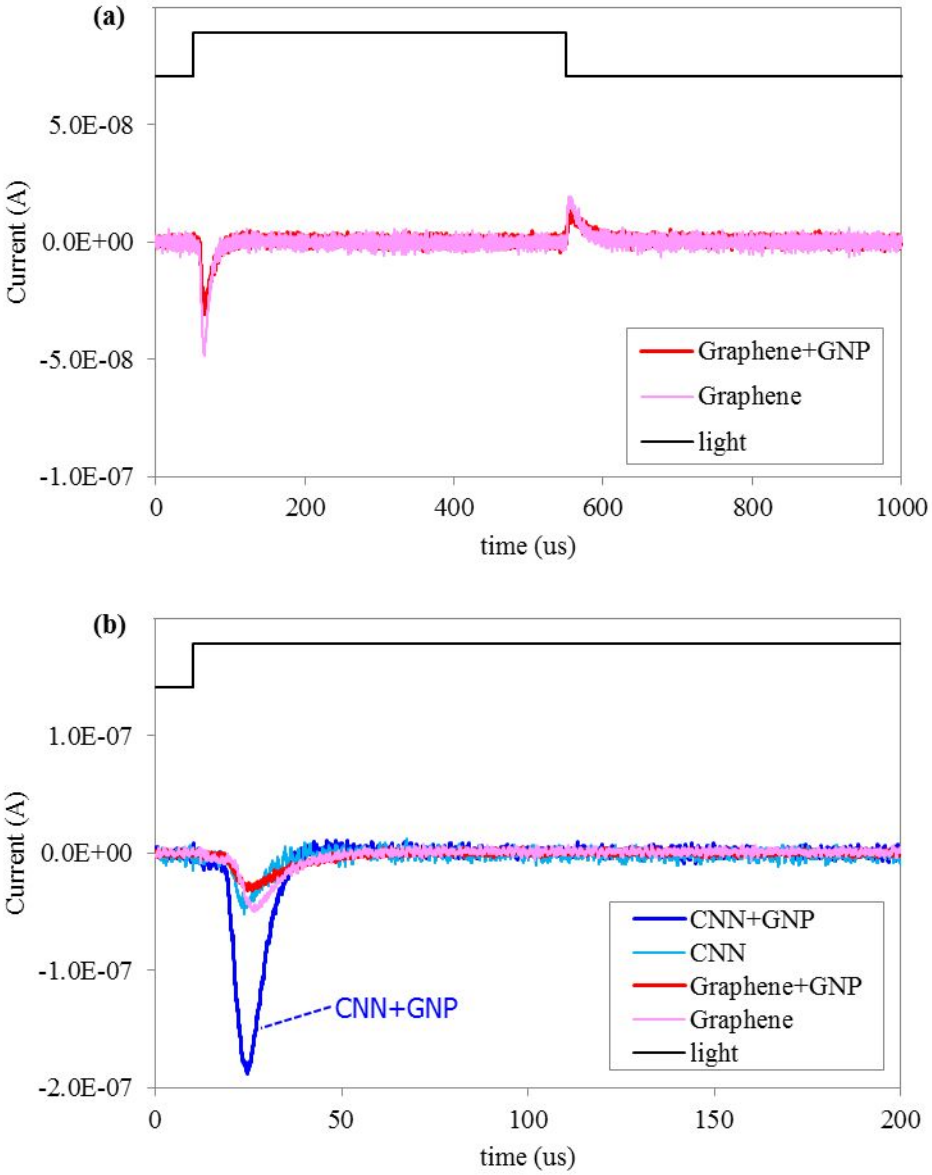


그림 3－7. 그래핀 채널 위의 금 나노입자 효과
(a) 금 나노입자 유무에 따른 그래핀 소자의 전류 응답,
(b) 탄소 나노튜브 vs. 그래핀 채널 위의 금 나노입자 효과 비교

3.3 광원 구동 조건에 따른 전류 응답

3.3.1 빛의 세기에 대한 영향성

광원에 더 높은 전압을 인가할수록 광 전력 (optical power) 이 증가하므로 GNP device 에 입사하는 빛의 세기에 대한 전류 응답의 변화를 살펴보았다. 광 다이오드에 빛을 비출 때 흐르는 전류와 해당 파장에서 광 다이오드의 반응도 (Responsivity, A/W) 를 이용하여 빛의 세기를 계산할 수 있다.

그림 3-8 은 소자에 빛을 비추고 있을 때 시간에 따른 전류 변화를 각 빛의 세기에 대해서 나타내었다. 빛을 켰을 때는 Preamplifier 에서 Source 쪽으로 전류가 흐르기 때문에 음의 전류값이 관찰된다. 빛의 세기가 가장 작은 조건과 비교하여 약 2배, 3배, 4배가 되도록 세기를 조절하였는데, 빛의 세기가 증가할수록 정점의 전류는 더 크게 증가한다. 빛의 세기가 4배로 증가할 때 정점의 전류는 약 2배 증가하므로 빛의 세기와 정점의 전류값이 단순한 선형 관계를 보이지는 않는다.

빛의 세기가 증가할수록 빛에 의한 응답 구간은 짧아진다. 펄스를 인가한 후 정점에 도달하는 속도 및 정점 이후에 전류가 감소하는 속도가 모두 빨라지며, 특히 정점 이후에 전류 감소 속도는 빛의 세기에 따라서 큰 차이를 보이고 있다.

빛의 세기별 각 전류값을 시간에 대해 적분한 전하량 $Q_{charging}$ 을 **그림 3-9** 에 나타내었다. 빛의 세기가 점차 증가함에 따라서 전하량은 2.53 pC 에서 2.72 pC 까지 증가한다.

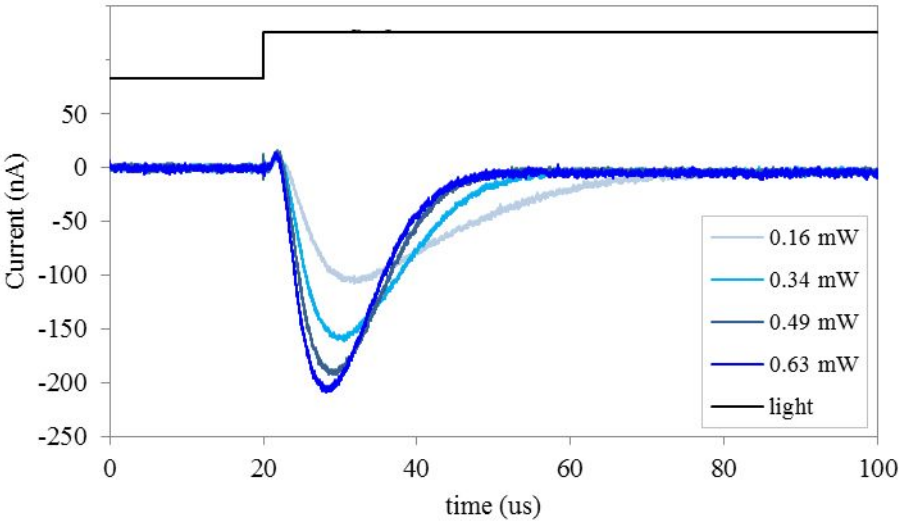


그림 3-8. 빛의 세기에 따른 전류 변화

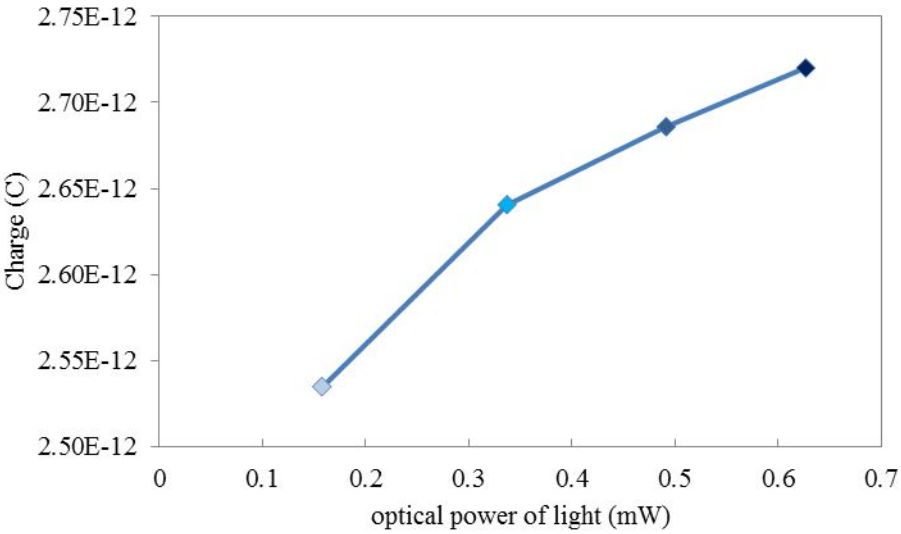


그림 3-9. 빛의 세기와 전하량의 상관 관계

3.3.2 펄스 주파수에 대한 영향성

빛을 얼마나 빨리 켜고 끄는지에 따라서 전하가 충전 또는 방전되는 양이 달라질 수 있으므로 광원을 구동하는 전압 펄스의 주파수 (Frequency) 에 따른 전류 응답의 변화를 살펴보았다.

그림 3-10 (a) 는 100 Hz 부터 1 kHz까지 펄스 주파수를 바꾸어 가며 GNP device 에 빛을 비추고 있을 때 시간에 따른 전류 변화를 측정한 값이다. 충전 전류를 자세히 측정한 그림 3-10 (b) 의 결과에 따르면, 펄스 주파수가 100 Hz 에서 1 kHz까지 증가할수록 정점에서의 전류값은 -368 nA 에서 -290 nA 로 감소한다.

펄스 주파수별 각 전류값을 시간에 대해 적분한 전하량을 **그림 3-11** 에 나타내었다. 펄스 주파수와 전하량은 단순한 선형 관계를 보이지 않는다. 주파수가 증가할수록 충전 전류의 전하량 $Q_{charging}$ 은 일정 수준까지 감소하는 경향을 나타내며, 방전 전류의 전하량 $Q_{discharging}$ 은 증가하다가 다시 감소하는 경향을 나타낸다.

주파수와 전류 응답 간의 상관 관계에 대한 개념도를 **그림 3-12** 에 나타내었다. 더 낮은 주파수에서는 Relaxation 상태가 상대적으로 길기 때문에 충전된 전하가 방전되기까지 충분한 시간이 있다. 반면에 높은 주파수에서는 Relaxation 상태가 상대적으로 짧기 때문에 충전된 전하가 모두 방전되기에는 시간이 부족하고, 결과적으로 충전 전류와 방전 전류가 감소하게 된다. 다시 말해서, 충전 전류와 방전 전류가 완전히 흐르기 위해서는 충전된 전하가 모두 방전되기 위한 충분한 시간이 필요함을 알 수 있다.

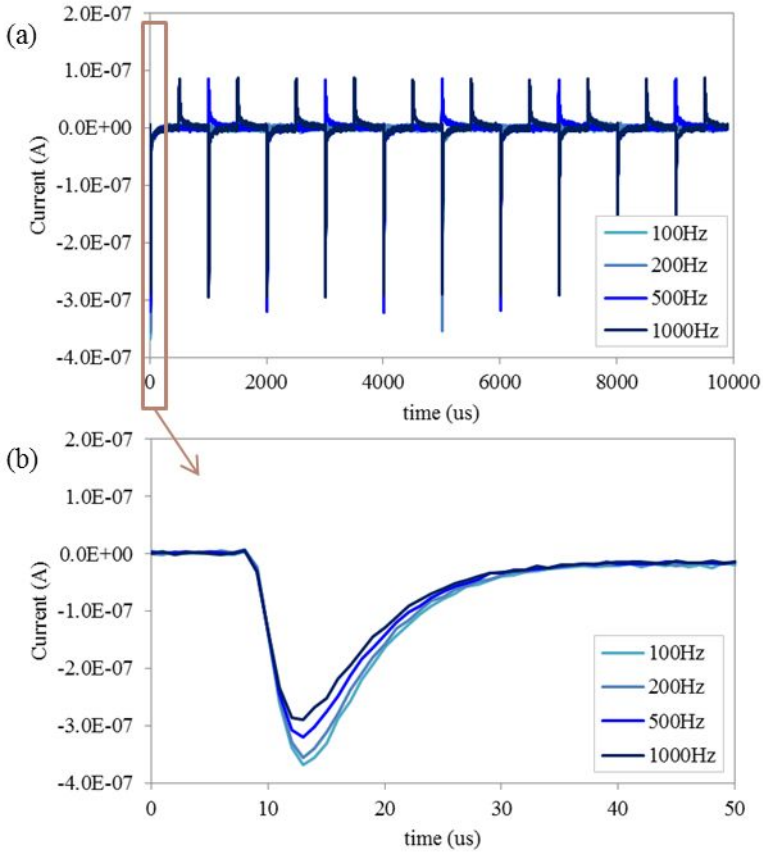


그림 3－10. 펄스 주파수에 따른 전류 변화
측정 시간: (a) 10 ms, (b) 50 μs

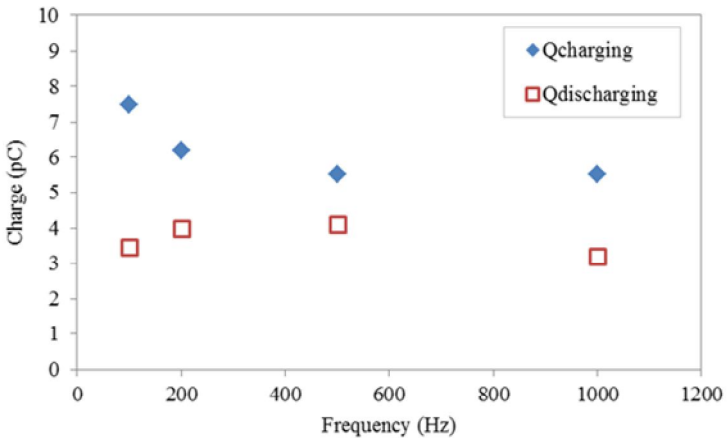


그림 3－11. 펄스 주파수와 전하량 간의 상관 관계

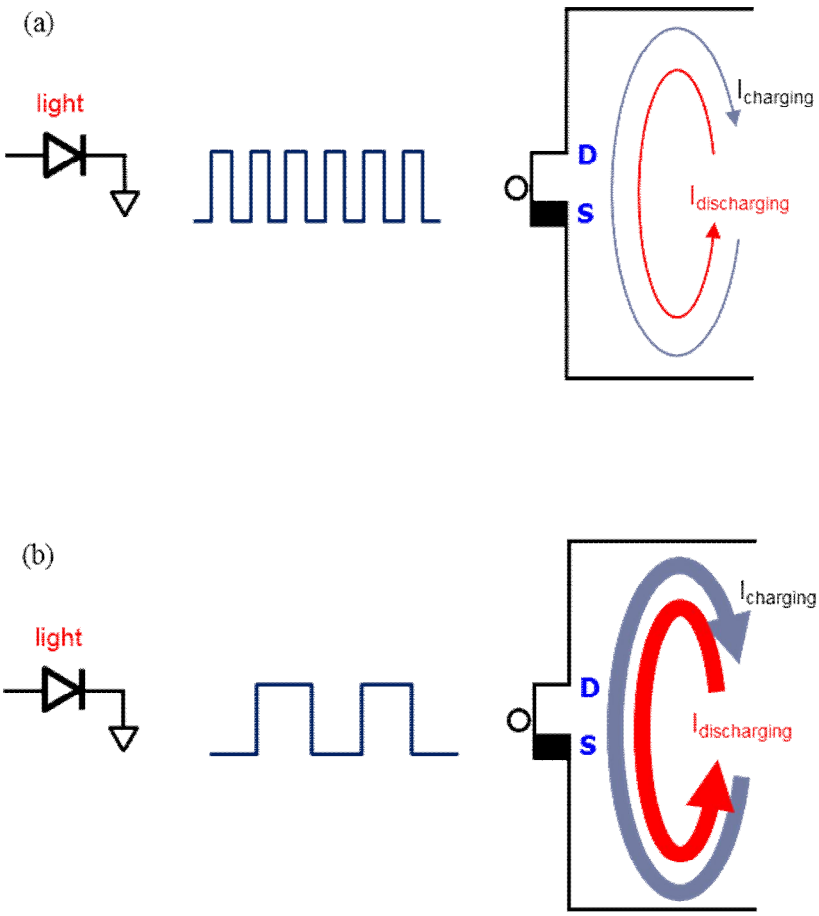


그림 3-12. 펄스 주파수에 따른 $I_{charging}$ 과 $I_{discharging}$ 차이
(a) 주파수가 높을 때 (b) 주파수가 낮을 때

3.3.3 펄스 Duty ratio 에 대한 영향성

펄스 주파수 변화와 비슷한 개념으로써, 소자에 얼마나 오랫동안 빛을 비추는지에 따라서 전하가 충전 또는 방전되는 양이 달라질 수 있으므로 광원을 구동하는 전압 펄스의 Duty ratio 에 따른 전류 응답의 변화를 살펴보았다.

그림 3-13 (a) 에서는 펄스의 Duty ratio 를 10 %부터 90 %까지 바꾸어 가며 GNP device 에 빛을 비추고 있을 때 시간에 따른 전류 변화를 나타내고 있다. 충전 전류를 자세히 측정한 그림 3-13 (b) 의 결과에 따르면, 펄스의 Duty ratio 가 증가할수록 정점에서의 전류값은 -327 nA 에서 -220 nA 로 감소한다.

펄스 Duty ratio 에 따른 전하량을 **그림 3-14** 에 나타내었다. Duty ratio 가 증가할수록, 다시 말해 펄스의 폭을 점차 증가시켜서 빛을 비추는 시간을 늘릴수록 충전 전류의 전하량 $Q_{charging}$ 은 많아진다. 반면에 $Q_{discharging}$ 의 경우, 그림 3-11 에서 살펴본 펄스 주파수에 따른 $Q_{discharging}$ 의 관계와 동일한 경향을 나타내는데, Duty ratio 증가와 함께 방전 전류의 전하량 $Q_{discharging}$ 이 증가하다가 다시 감소하고 있다.

Duty ratio 와 전류 응답 간의 상관 관계에 대한 개념도를 **그림 3-15** 에 나타내었다. Duty ratio 가 낮으면 Relaxation 상태가 길기 때문에 충전된 전하가 방전되기 위한 충분한 시간이 있다. 반면에 Duty ratio 가 높으면 Relaxation 상태가 상대적으로 짧기 때문에 충전된 전하가 모두 방전되기에는 시간이 부족하다. 충전 전류와 방전 전류가 완전히 흐르기 위해서는 충전된 전하가 모두 방전되기까지 충분한 시간이 필요하다는 것을 알 수 있다.

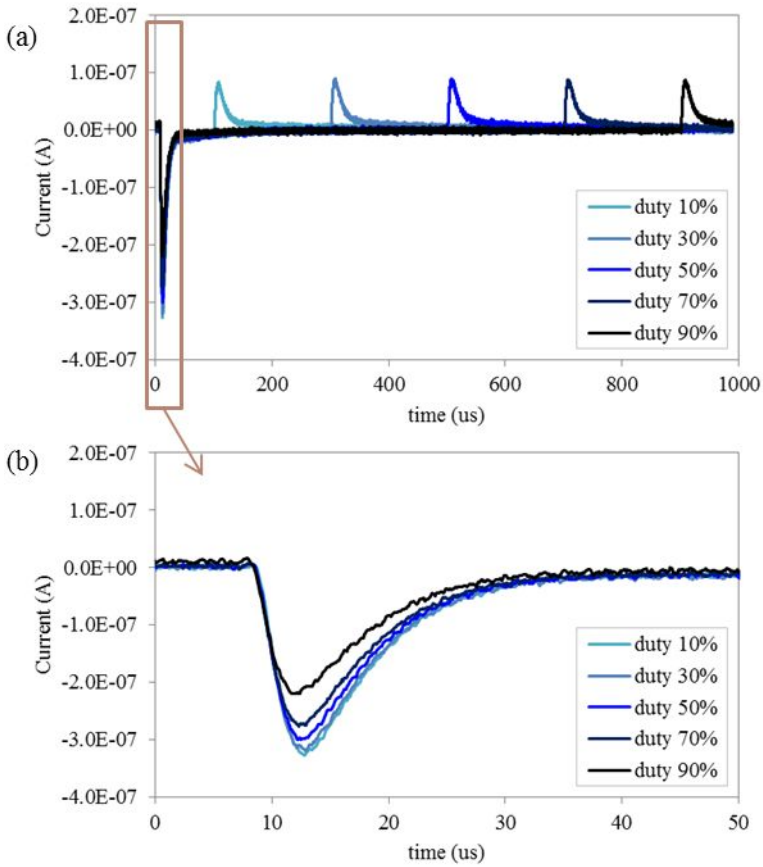


그림 3－13. 펄스 듀티비에 따른 전류 변화
측정 시간: (a) 1 ms, (b) 50 μs

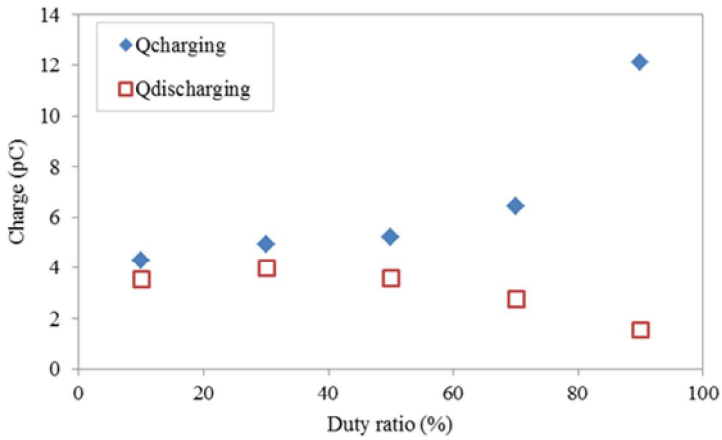


그림 3－14. 펄스 듀티비와 전하량 간의 상관 관계

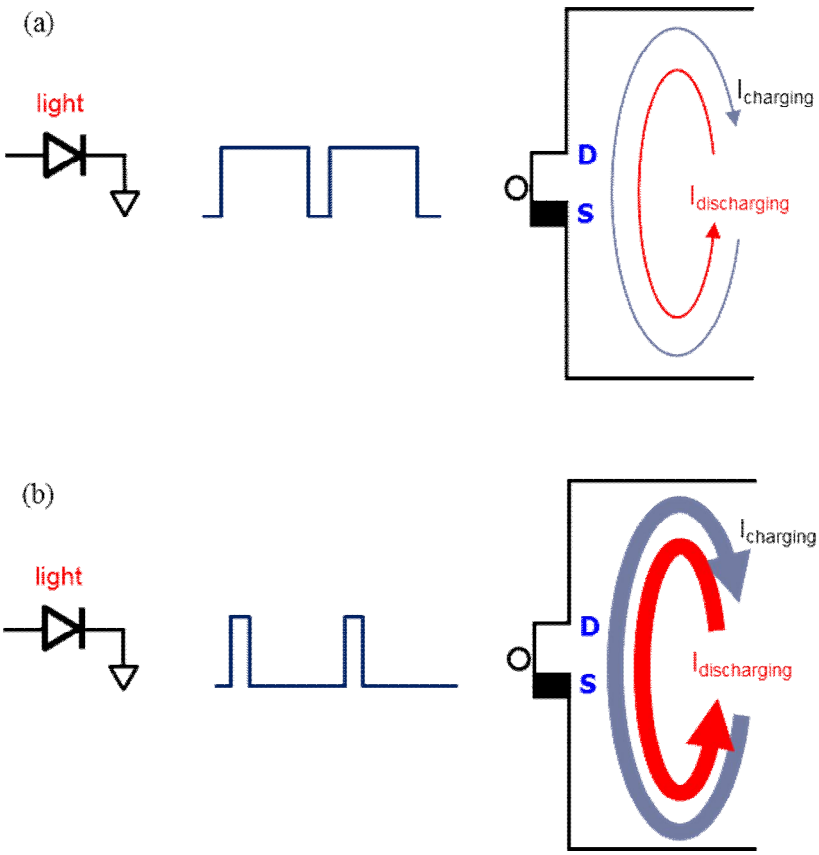


그림 3-15. 펄스 듀티비에 따른 $I_{charging}$ 과 $I_{discharging}$ 차이
(a) 듀티비 높을 때 (b) 듀티비 낮을 때

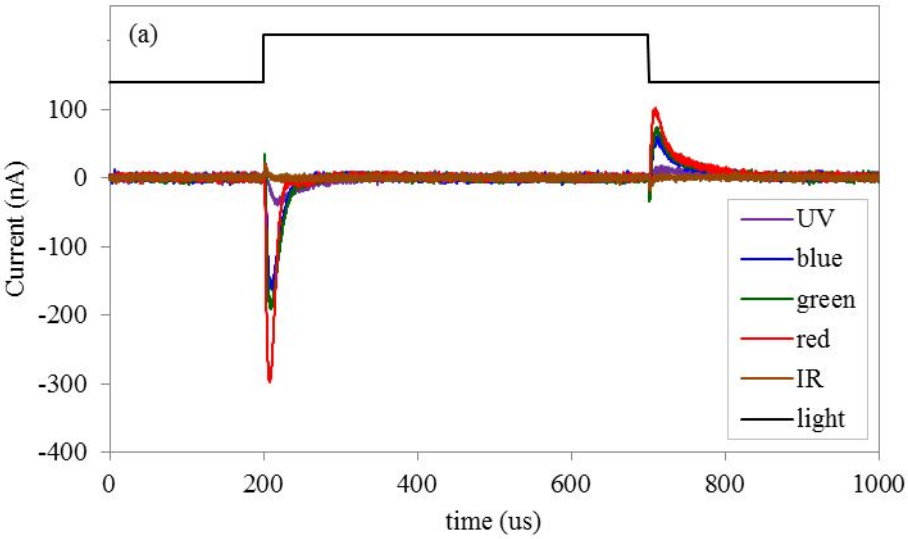
3.4 빛의 파장과 전류 응답의 상관 관계

파장 (wavelength, λ) 280 nm ~ 850 nm 의 범위에 있는 다양한 광원을 이용하여 실험하였으며, 결과 분석에 사용한 대표적인 광원을 **표 3-1** 에 나타내었다. 각 파장에 대해서 쉽게 구별하기 위하여 이름 – 자외선 (UV, Ultraviolet), 파랑 (Blue), 초록 (Green), 빨강 (Red), 적외선 (IR) – 을 함께 표기하였다. 각 파장에 해당하는 광자 (Photon) 에너지 및 Photon 개수를 동일하게 맞추기 위한 빛의 세기 조건은 다음과 같다.

파장	빛	광자 에너지	빛의 세기
280 nm	자외선	4.43 eV	79 mW/cm^2
470 nm	파랑	2.64 eV	47 mW/cm^2
520 nm	초록	2.36 eV	42 mW/cm^2
660 nm	빨강	1.88 eV	33 mW/cm^2
850 nm	적외선	1.46 eV	26 mW/cm^2

표 3－1. 빛의 파장과 광자 에너지 및 빛의 세기

그림 3-16 은 빛의 파장별로 시간에 따른 GNP device 의 전류 응답을 나타내었다. 그림 3-16 (a) 는 한 주기 1 ms 동안 excitation 상태와 relaxation 상태가 모두 포함된 전류 응답이고, 그림 3-16 (b)는 0.1 ms 동안 excitation 상태가 포함된 전류 응답을 세밀하게 측정한 값이다. 전체 광원 중에서 IR 을 소자에 비추는 경우에는 빛에 대한 변화가 없고 전류가 흐르지 않는다.



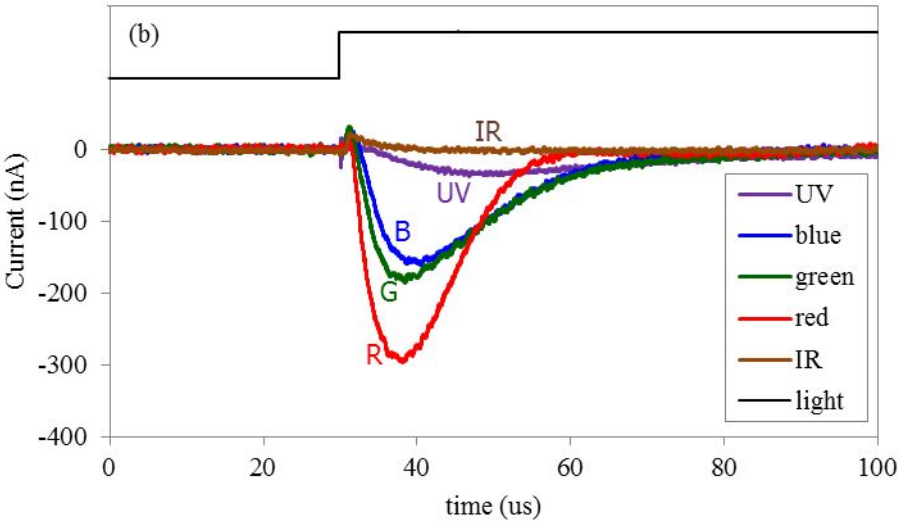


그림 3－16. 빛의 파장에 따른 전류 변화
(a) 1 ms : excitation and relaxation, (b) 0.1 ms : excitation

파랑, 초록, 빨강 등의 가시 광선과 자외선을 GNP device 에 비추면 시간에 따라서 전류가 변하는데, 가시 광선의 경우에는 빛이 켜지는 순간에 음의 전류가 뚜렷하게 관찰되고 자외선의 경우에는 빛에 의한 전류 변화는 감지되지만 가시 광선에 비해 미약한 수준이다.

그림 3-16 의 각 파장별 전류 응답 그래프로부터 정점에서의 최대 전류값 (a) 과 펄스가 인가된 후 정점에 도달하기까지의 시간 (b) 을 확인하여 **그림 3-17** 에 나타내었다. 빛에 대한 반응이 나타나지 않는 IR을 제외하면, 파장이 길어질수록 최대 전류값의 크기는 커지고 응답 시간은 짧아지면서 칩이 민감하게 반응한다. 그림 3-17 (a) 에서 excitation 상태일 때 파장에 대한 최대 전류값의 기울기가 relaxation 상태의 기울기보다 더 크기 때문에, 파장이 길어질수록 excitation 상태와 relaxation 상태의 전류 차이는 더 증가한다.

소자에 쌓이거나 방전되는 총 전하량을 비교하고자 각 파장별 전류값을 시간에 대해서 누적 적분할 때 전하량의 변화를 **그림 3-18** (a) 에 나타내었고, 이때 $Q_{charging}$ 과 $Q_{discharging}$ 두 전하량과 빛의 파장 간의 상관 관계를 그림 3-18 (b) 에 나타내었다. 파장이 길어질수록 전하량이 증가하며, 모든 파장에 대해서 $Q_{charging}$ 이 $Q_{discharging}$ 보다 크다.

금속 나노입자는 SPR에 의해서 빛을 최대로 흡수하는 특정한 파장이 존재하며 그 파장을 중심으로 자외선–가시광선 스펙트럼 (UV-Vis spectrum) 을 나타낸다 [18, 19]. 그림 3-17 (a) 최대 전류값과 그림 3-18 (b) 전하량은 빨강색 광원에서 가장 큰 반응을 나타내며 빛의 파장에 대해 종 모양의 상관 관계를 갖기 때문에 기존 연구 결과와 유사한 경향으로 나타나고 있으며 표면 플라즈몬 공명에 의해 발생하는 현상이라고 추측할 수 있다.

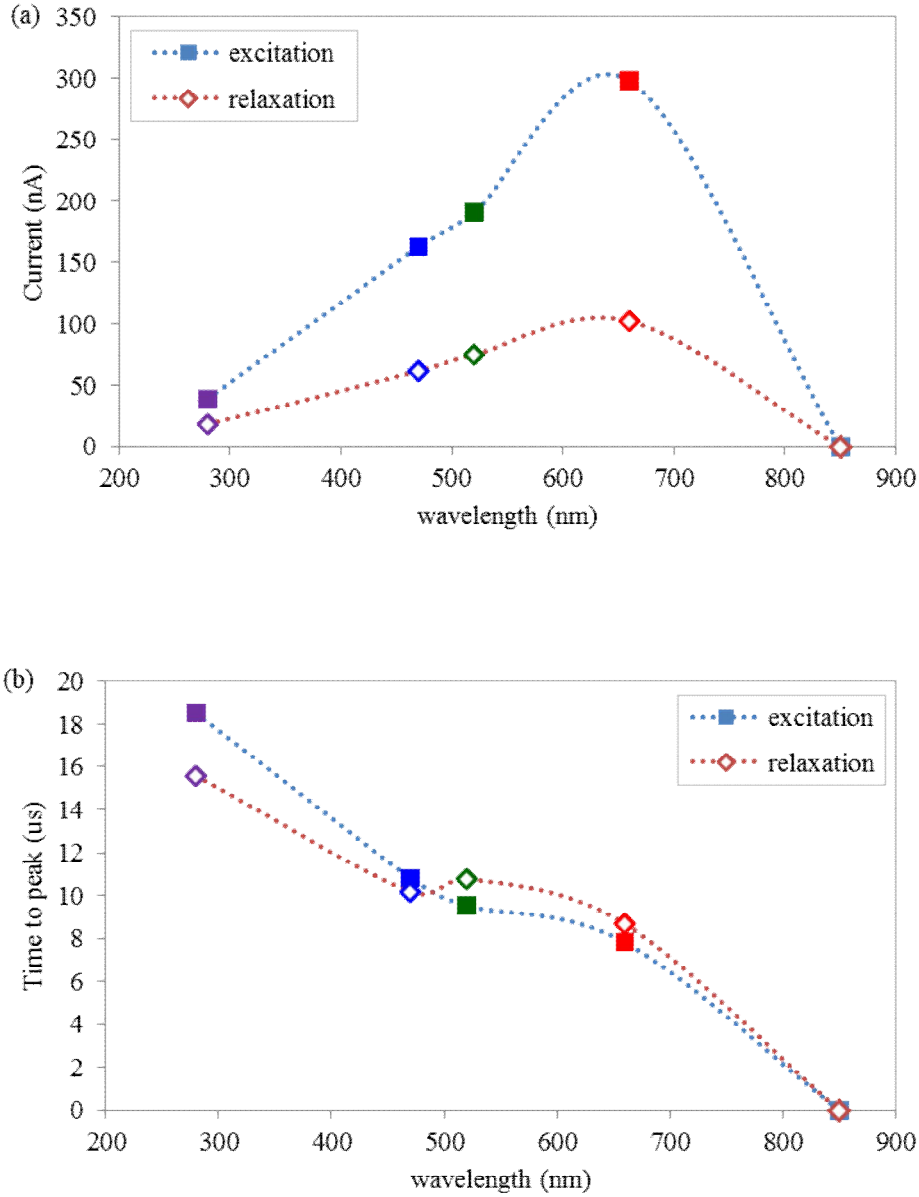
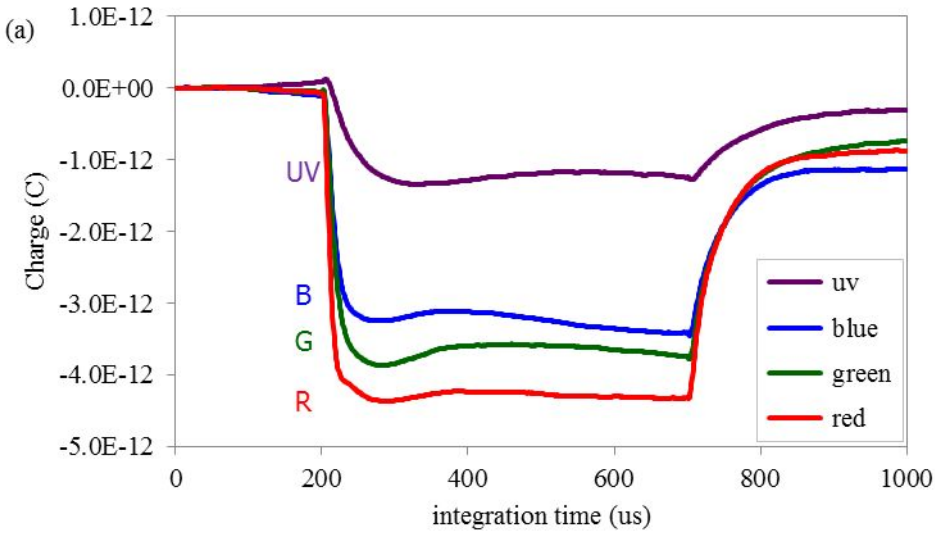


그림 3-17. (a) 정점의 전류값과 빛의 파장 간의 상관 관계
(b) 정점까지 도달하는 시간과 빛의 파장 간 상관 관계



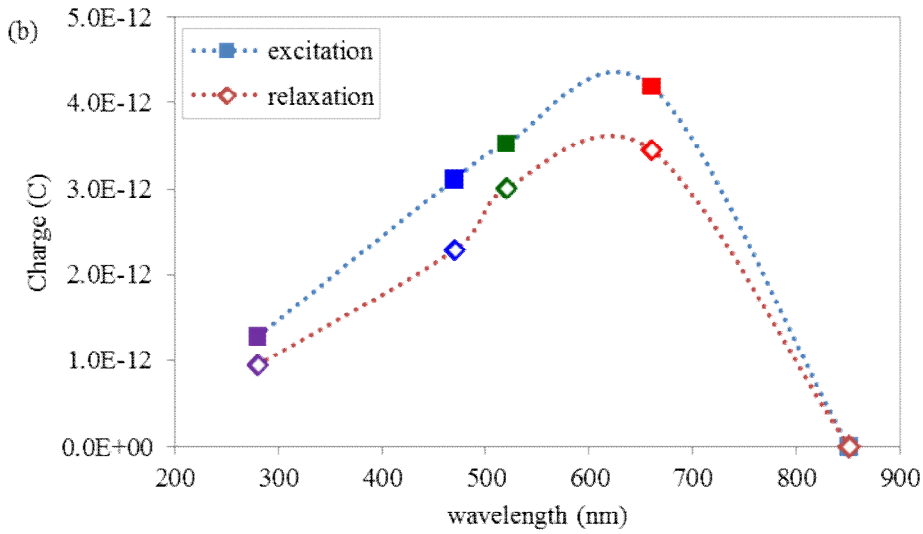


그림 3－18. (a) 빛의 파장별 전류값을 시간에 대해 적분한 전하량 변화
(b) 전하량 $Q_{charging}$, $Q_{discharging}$과 빛의 파장 간의 상관 관계

3.5 전류 응답의 방향성

그림 2-4 측정 시스템에 표현했듯이 GNP device 에서 한쪽 전극에는 직류 전원을 인가하고, 반대쪽 전극에서 흐르는 전류는 Preamplifier 를 거쳐서 전압으로 증폭한 후 오실로스코프를 통해 측정하였다. 지금까지 살펴본 데이터는 모두 Source 에서 측정한 결과로서, 그림 3-2 에서 살펴본 것처럼 빛을 켰을 때는 Preamplifier 에서 Source 방향으로 전류가 흐르고, 빛을 끌 때는 Source 에서 Preamplifier 방향으로 전류가 흐른다.

그런데 Source 와 Drain, 측정 장비에서 흐르는 전류의 방향을 보다 명확하게 규명할 필요가 있다. 그림 2-4 의 측정 시스템에서 Source 대신 Drain 으로 위치를 바꾸면 Drain에서 흐르는 전류를 측정할 수 있다. 그래서 Preamplifier 와 연결하는 전극을 Source 또는 Drain으로 바꾸고 반대편 전극은 접지 (Ground) 한 상태로 두 차례 측정한 전류값을 비교함으로써 Source, Drain 각 전극에서의 전류 방향을 확인할 수 있다. 또 다른 측정 방법으로는 **그림 3-19** 와 같이 Source 와 Drain 전극에 각각 연산 증폭기 (Operational amplifier, OP-amp) 를 연결한 후 Source 와 Drain 의 전류를 동시에 측정함으로써 전류 방향을 확인할 수 있다.

GNP device 에 빛을 비추었을 때 Source 와 Drain 에서 측정한 전류를 **그림 3-20** 에 함께 보여주었다. Source 전류는 지금까지 살펴본 데이터와 동일한 경향을 나타내고 Drain 전류는 Source 전류와 비교하여 절대값은 비슷하고 부호는 서로 다르다. 빛을 켰을 때는 Drain 전극에서 양의 전류가 측정되므로 Drain 으로부터 OP-amp 로 전류가 흐르고, 빛을 끌 때는 음의 전류가 측정되므로 OP-amp 로부터 Drain 으로 전류가 흐른다는 것을 의미한다.

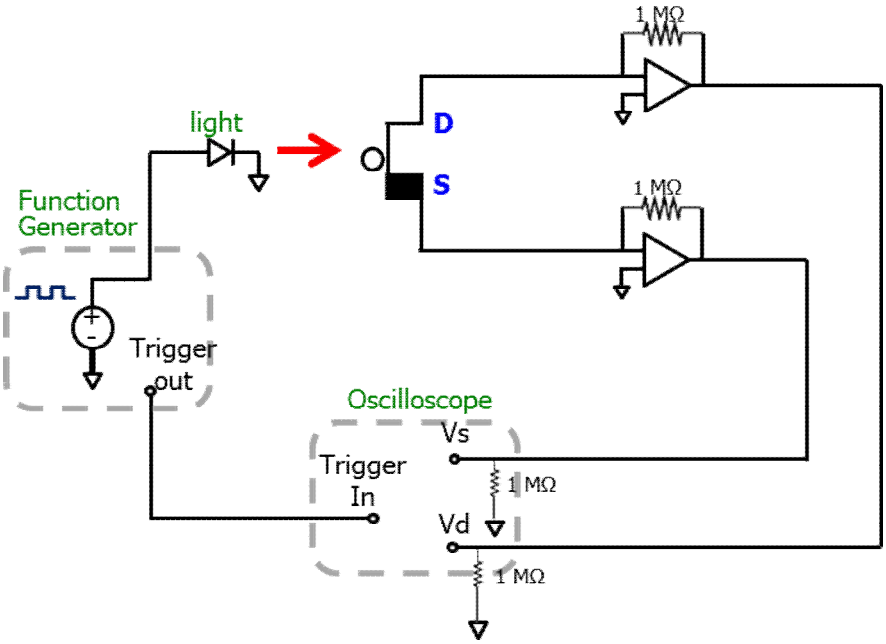


그림 3-19. Source, Drain 전극에서 흐르는 전류 측정 시스템

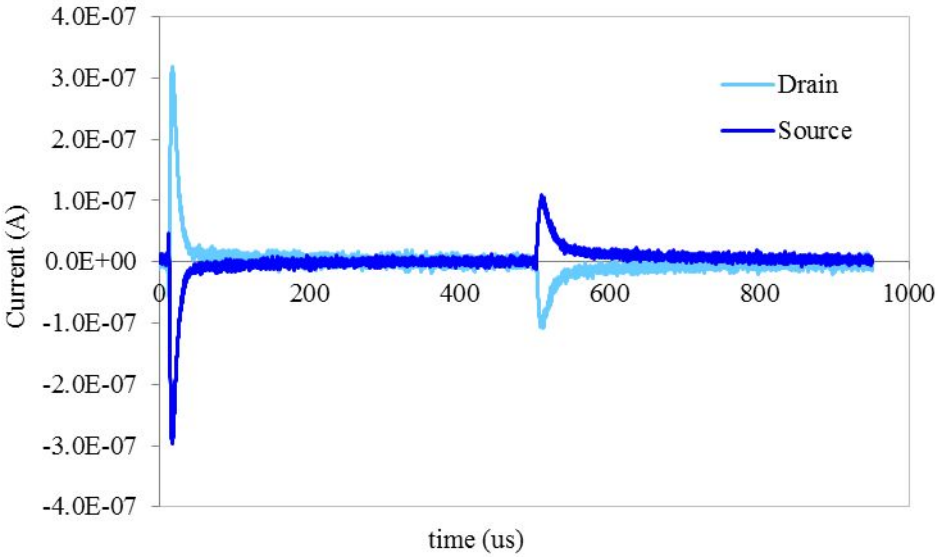


그림 3-20. Source와 Drain에서 각각 측정한 전류 변화

3.4 장까지 살펴본 Source 전극의 실험 결과는 빛을 켰을 때 전류가 Source 를 통해 소자로 흐르기 때문에 Drain 전극에서도 동일하게 Drain 을 통해 소자로 흐를 것이라고 생각하였다. 그래서 **그림 3-21** 에 표시한 것처럼 GNP device 에 빛을 비추면 Source 와 Drain 양쪽에서 소자 안으로 전류가 흐를 것이라고 예측하였다. 또한 빛을 끄면 Source 와 Drain 양 전극으로부터 소자 바깥으로 전류가 흐를 것이라고 예측하였다.

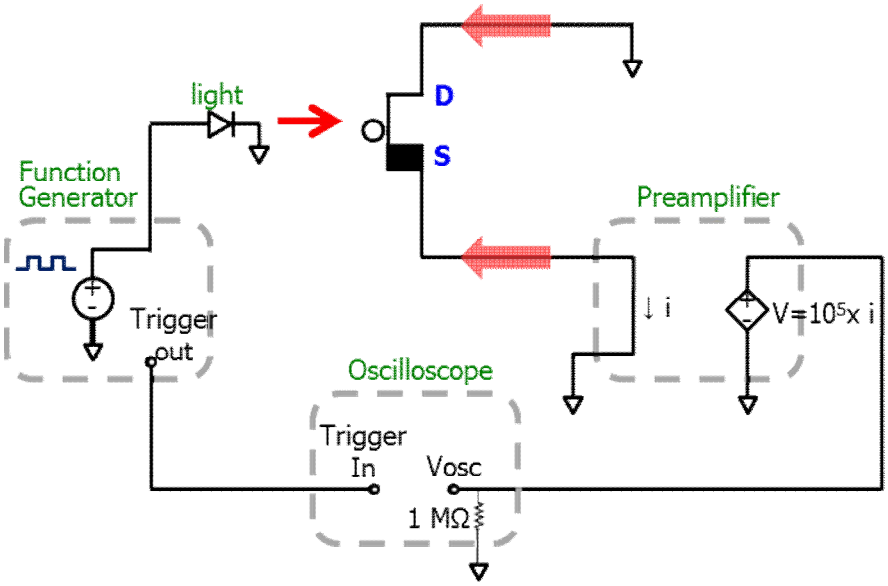


그림 3－21. 빛을 주었을 때 전류의 흐름을 예측한 방향

그런데 그림 3-20 에서 실제 전류의 방향은 예측과는 다르게 나타났다. 빛을 켰을 때, Source 전류는 OP-amp 에서 Source 로, Drain 전류는 Drain 에서 OP-amp 로 전류가 흐르기 때문에 이를 종합해보면 Source 에서 Drain 으로 전류가 흐른다는 것을 알 수 있다. 또한 빛을 끌 때, Drain 전류는 OP-amp 에서 Drain 으로, Source 전류는 Source 에서 OP-amp 로 전류가 흐르기 때문에 이로부터 Drain 에서 Source 로 전류가 흐른다는 것을 알 수 있다. **그림 3-22** 에 표시한 것처럼 GNP device 에

빛을 비추면 실제로는 Source 에서 Drain 으로 단방향성 (Unidirectional) 전류가 흐른다. 또한 빛을 끄면 이와는 역방향으로 Drain 에서 Source 로 단방향성 전류가 흐른다.

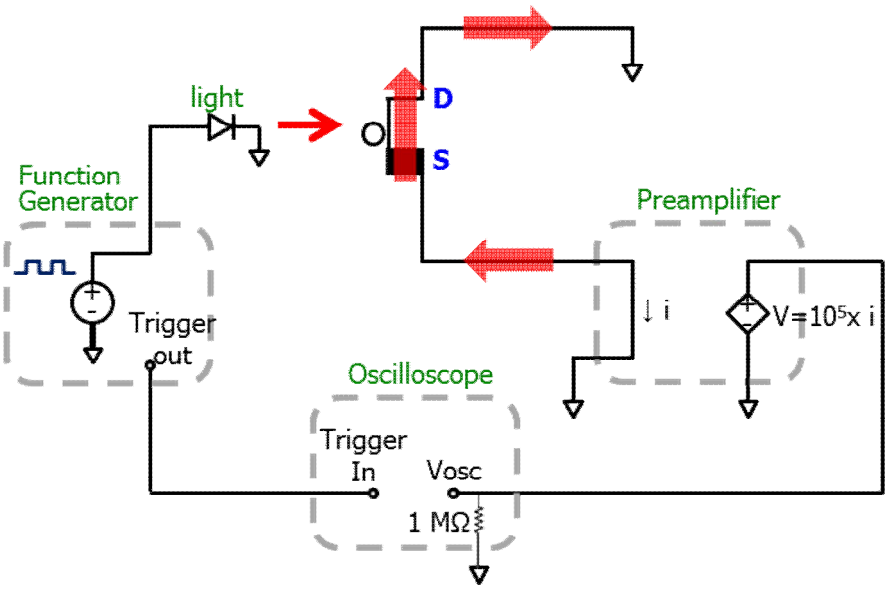


그림 3－22. 빛을 주었을 때 전류가 흐르는 실제 방향

Source 전류와 Drain 전류는 비슷한 수준이지만 완전히 동일하지는 않은데, **그림 3-23** 과 같이 Source 전극과 Drain 전극을 함께 묶고 (tied) OP-amp 를 연결하여 전류 I_{tied} 를 측정할 수 있다. **그림 3-24** 에서 보는 것처럼 전류 I_{tied} 는 매우 작지만 빛을 켜고 끔에 따라서 응답을 하며, 그 값은 Source 전류와 Drain 전류 간의 차이와 같으므로 키르히호프의 전류 법칙 (Kirchhoff's current law) 이 성립한다. Source 와 Drain 두 전극을 묶고 소자에 빛을 비추었을 때 excitation 상태에서 흐르는 전하량은 약 0.1 pC 으로 나타났다.

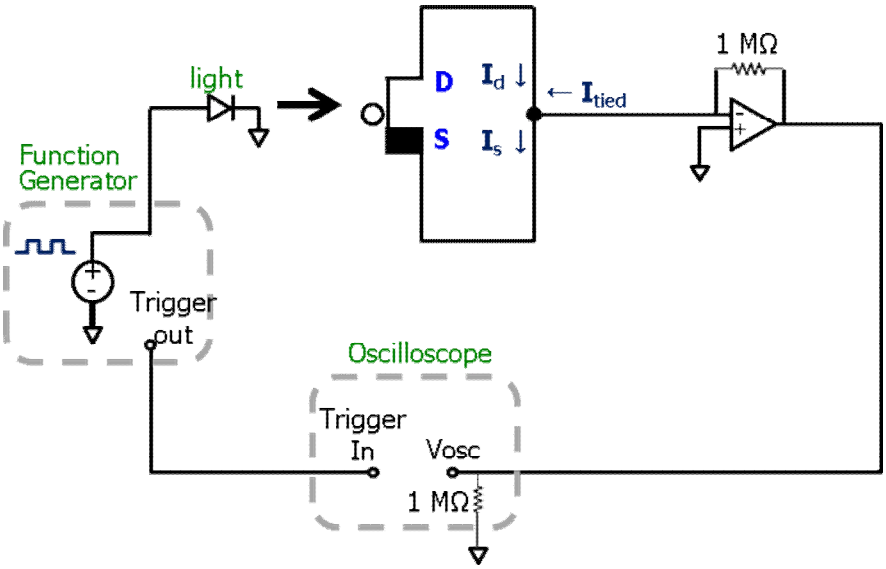


그림 3-23. Source, Drain 두 전극을 묶은 회로

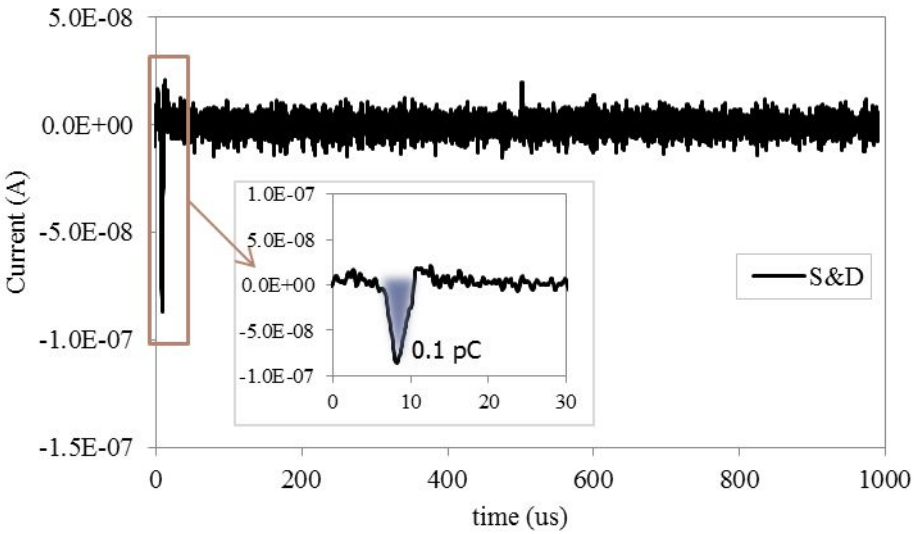


그림 3-24. Source와 Drain을 묶었을 때 I_{tied} 전류 응답
: 1 ms 측정, (Inset: 30 μs 측정)

3.6 소자의 비대칭 구조에 대한 영향성

GNP device 에 빛을 비추었을 때 Source 와 Drain 양쪽 전극으로부터 소자 안으로 전류가 흐를 것이라는 예측과는 다르게, Source 에서 Drain 으로 단방향성 전류가 흐르는 것은 Source 와 Drain 의 비대칭성에서 기인하는 것으로 보인다.

그림 3-25 (a) 에서 보는 것처럼, Source 전극과 Drain 전극의 크기가 같은 대칭 구조 (Symmetry) 소자는 Source – Channel 과 Drain – Channel 이 대칭성을 갖는 n-p-n Junction 을 만든다. 그러나 GNP device 의 경우에는, Drain 전극보다 큰 Source 전극에서는 보다 많은 탄소 나노튜브와 맞닿기 때문에 접촉 저항 (Contact resistance) 이 상대적으로 작아지게 되고 그림 3-25 (b) 에 나타낸 것처럼 Source – Channel 간 Junction 이 약해져서 비대칭성을 띠게 된다.

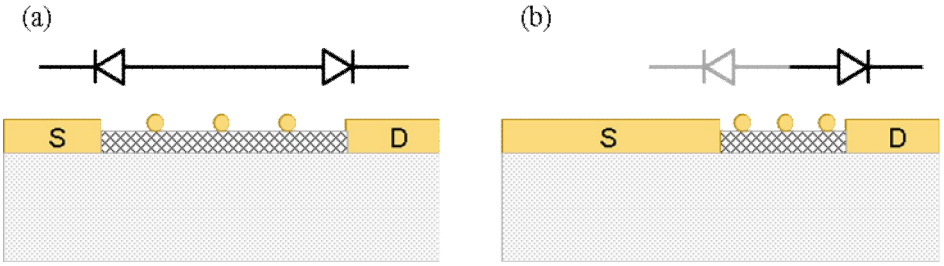


그림 3-25. Source와 Drain 간 대칭성에 따른 다이오드 효과
(a) 대칭인 경우 (b) 비대칭인 경우

GNP device 는 전해질 (Electrolyte) 조건에서 다이오드 (Diode) 특성을 나타내므로 [20], 비대칭성 효과와 다이오드 효과를 분석하고자 공기, 물 (Deionized water, DI water), PBS (Phosphate Buffered Saline) 용액 조건에서 전류를 측정하였다.

그림 3-26 은 공기, 물, PBS 용액 조건에서 GNP device 의 I-V 특성 (Current-Voltage characteristic) 측정 결과를 보여준다.

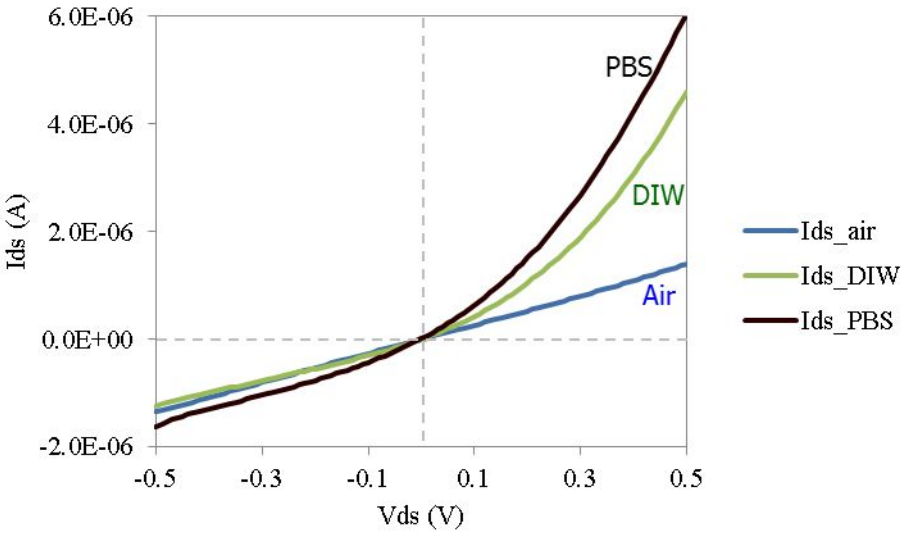


그림 3-26. 공기, 물, PBS 조건에서 I-V 특성

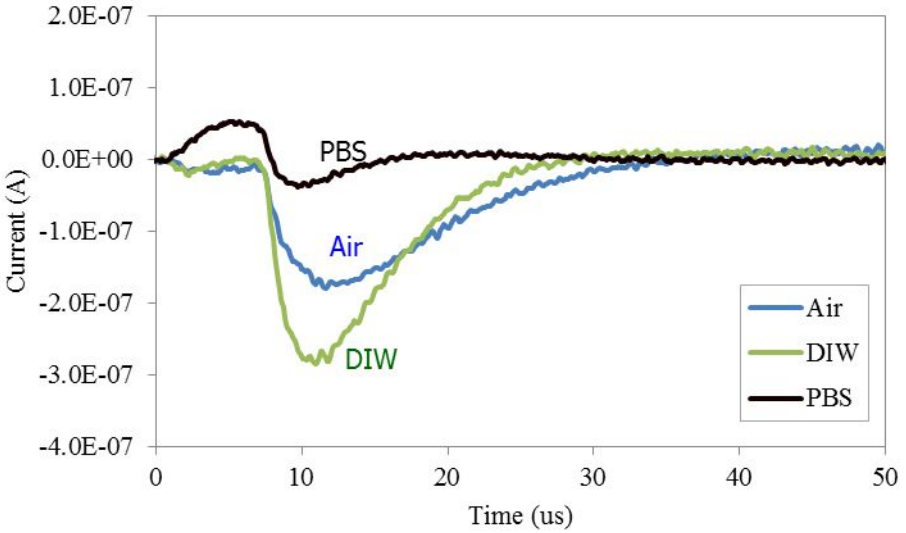


그림 3-27. 공기, 물, PBS 조건에서 시간에 따른 전류 변화

공기 중에서는 인가하는 전압을 높일수록 소자에서 흐르는 전류도 증가하면서 선형의 관계를 나타내지만, 물이나 PBS 용액에서는 곡선 형태로 바뀌면서 다이오드의 특성을 나타내게 된다.

각 조건별 시간에 대한 전류의 변화를 관찰한 **그림 3-27** 을 보면, 빛에 대한 전류 응답의 크기가 서로 다르다. 공기 중에서 측정한 전류의 최대값과 비교하면, 물에서 측정한 전류의 최대값은 더 커지고 PBS 용액에서 측정한 전류의 최대값은 훨씬 작아진다. 물에서는 Drain 전극에서의 다이오드 효과가 더 커져서 Source 에서 Drain 방향의 전류가 증가하는 것으로 보인다.

반면에, PBS 용액에서는 Source 전극에서의 다이오드 효과가 더 커지면서 그림 3-25 (b) 에서 설명한 비대칭성 효과가 상쇄되어 더 적은 전류가 흐르는 것으로 보인다. PBS 용액에서 GNP device 에 나타나는 다이오드 효과 및 등가 회로를 **그림 3-28** 에 나타내었다.

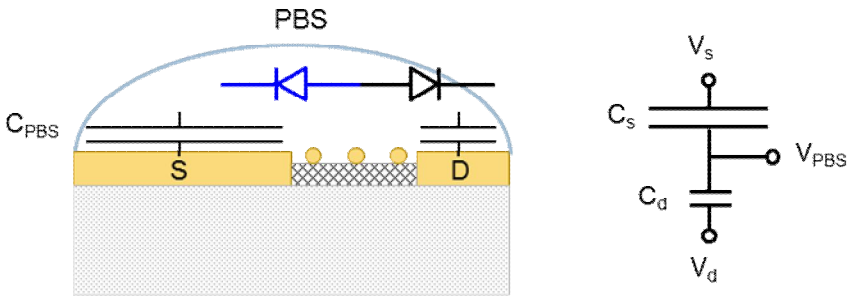


그림 3-28. PBS 용액에서의 GNP device 등가 회로

PBS 용액의 농도를 0.0001 % ~ 100 % 까지 바꾸어가며 I-V 특성을 측정하여 **그림 3-29** 에 나타냈는데, 농도 변화에 따라 완전한 비례 관계를 나타내지는 않지만 모두 다이오드 특성을 보인다.

그림 3-30 은 PBS 용액 농도별 시간에 대한 전류의 변화인데, 농도가 높아질수록 Source 의 다이오드 효과가 커지면서 전류가 점차 적게 흐르는 것을 알 수 있다.

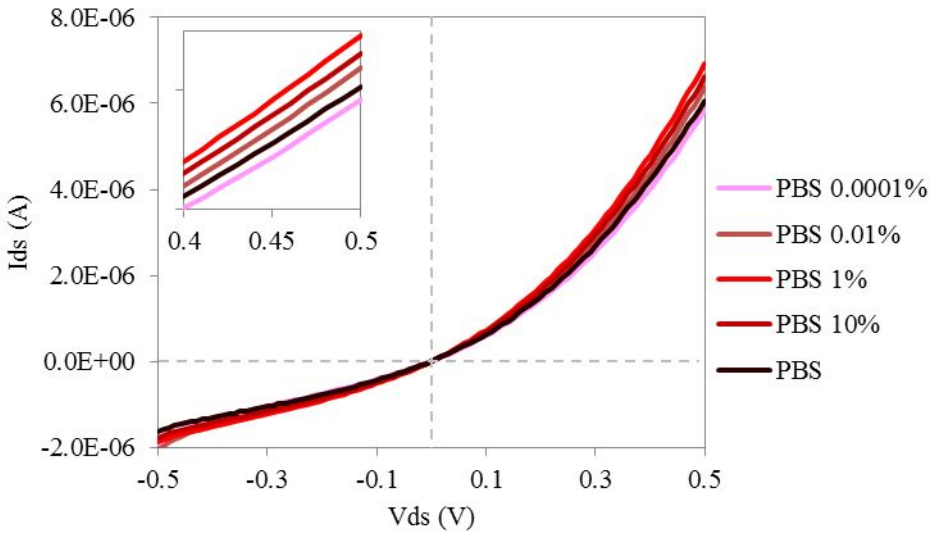


그림 3-29. PBS 용액 농도에 따른 I-V 특성
(Inset: 0.4 V ~ 0.5 V 구간)

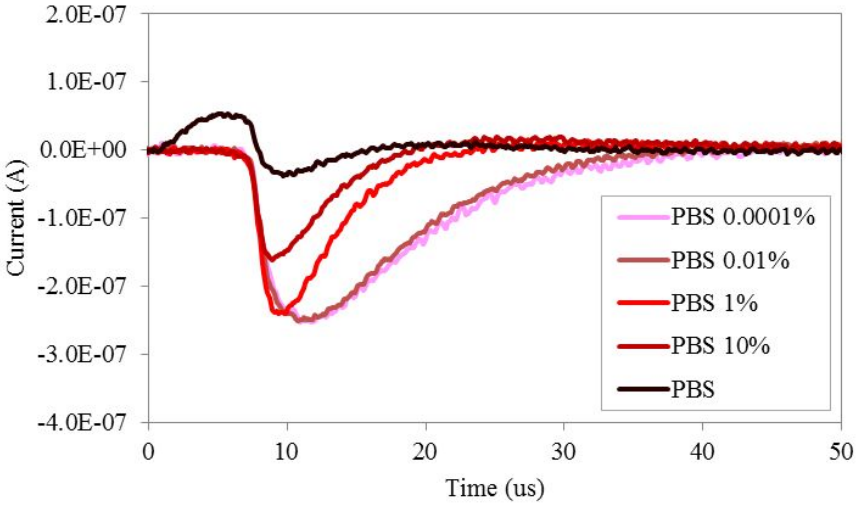


그림 3-30. PBS 농도에 따른 전류 변화

3.7 실험 결과 분석

금속 물질에 빛을 비추면 Photon과 Electron 이 충돌하는데 이때 금속 일함수 (Work function) 이상의 큰 에너지를 가진 빛을 주면 표면에서 전자가 방출된다. 이러한 광전 효과 (Photoelectric effect)는 빛을 비추는 동안에 지속적으로 발생하는 현상이다. 3.1 장에서 살펴본 것처럼 광 다이오드의 지속적인 응답과 비교하여, GNP device 에서는 빛을 계속 비추고 있음에도 빛에 의한 전류 응답이 일시적으로 나타난 후 사라지고 있으므로 광전 효과로는 본 현상을 설명할 수 없다.

단순한 광전 효과가 아닌 빛에 의한 효과를 이해하기 위해서, 빛의 파장과 금 나노입자의 유무에 따라서 전류 응답이 달라진다는 사실에 주목하였다. 이러한 실험적 관찰은 표면 플라즈몬 공명에 의한 효과임을 추측할 수 있고, 다음의 반응 메커니즘으로 이해할 수 있다.

빛을 GNP device 에 비추게 되면 표면에 있는 금속의 전자들이 진동하면서 표면 플라즈몬 공명이 발생한다. 표면 플라즈몬 공명으로 인해 표면에서의 전자기장 (Electromagnetic Field)의 세기가 증폭되고, 금 나노입자의 일함수가 증가하여서 금과 탄소 나노튜브 사이의 쇼트키 접합에서 장벽 (Barrier) 이 커지게 된다. 탄소 나노튜브 네트워크 채널에 있는 정공 (hole)이 빛이 켜지고 꺼짐에 따라서 쇼트키 접합의 안쪽 방향으로 또는 바깥쪽 방향으로 움직이면서 전류가 발생한다.

금 나노입자가 없는 CNN device, 금 나노입자가 있는 GNP device 의 에너지 밴드 다이어그램 (Energy band diagram) 을 **그림 3-31** 과 **3-32** 에 각각 나타내었다. GNP device는 금 나노입자를 갖고 있으므로 빛에

의해서 변화하는 쇼트키 접합 영역이 더 크기 때문에 CNN device 보다 더 많은 정공이 움직일 수 있다. 그림 3-6 에서 살펴본 것처럼 GNP device 의 전류가 더 크게 나타난다.

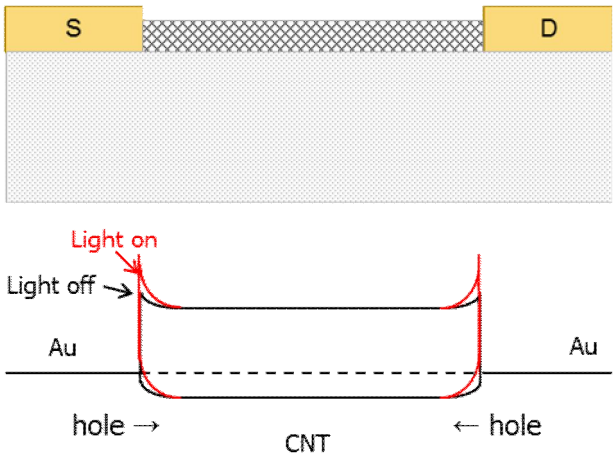


그림 3-31. 금 나노입자가 없는 소자의 에너지 밴드 다이어그램

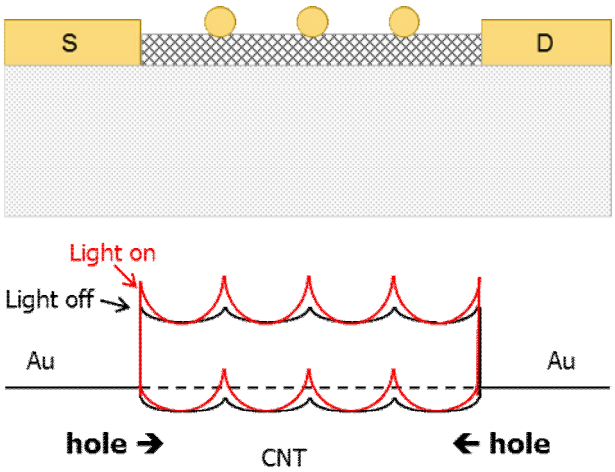


그림 3-32. 금 나노입자가 있는 소자의 에너지 밴드 다이어그램

제 4 장 결론

탄소 나노튜브 네트워크 위에 금 나노입자를 증착한 GNP device 에 빛을 비추었을 때 다음과 같이 독특한 전기적 특성 변화를 관찰하였다.

빛에 의해서 지속적인 응답이 나타나는 대신, 빛이 켜지거나 꺼지는 전이 상태에서만 순간적으로 반응이 나타난다. 적외선에 대해서는 응답이 없고 가시광선과 자외선에서는 파장이 길어질수록 민감하게 반응하여 전류 응답과 빛의 파장 간의 상관 관계가 있다. 탄소 나노튜브 소자에서 금 나노입자에 의해 더 큰 전류 응답이 나타난다. 빛을 켰을 때는 소스에서 드레인으로, 빛을 끌 때는 드레인에서 소스로 단방향성 전류가 관찰된다.

이러한 현상들은 금 나노입자의 일함수가 바뀌는 것으로 반응 메커니즘을 설명할 수 있다. 소자에 빛을 비추었을 때 표면 플라즈몬 공명에 의해서 금속 일함수가 바뀌어서 금과 탄소 나노튜브 네트워크 채널 사이의 쇼트키 접합에 변화가 생기고 전류가 흐르게 된다고 해석하였다. 본 연구를 바탕으로 추가적인 실험과 이론적인 해석이 이루어진다면 표면 플라즈몬 공명에 의한 변화를 감지하는 새로운 센서 기술에 대해 적용할 수 있다.

참고 문헌

[1] S. A. Maier, *Plasmonics: fundamentals and applications* (Springer, 2010)

[2] S. Enoch, and N. Bonod, *Plasmonics: from basics to advanced topics* (Springer, 2012)

[3] B. Liedberg, C. Nylander, and I. Lundstrom, "Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing," Sensors and Actuators 4, 299-304 (1983)

[4] J. Homola, S. S. Yee, and G. Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors: review," Sensors and Actuators B 54, 3-15 (1999)

[5] A. J. Haes, and R. P. V. Duyne, "A Nanoscale Optical Biosensor: Sensitivity and Selectivity of an Approach Based on the Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy of Triangular Silver Nanoparticles." J. Am. Chem. Soc. 124, 10596-10604 (2002)

[6] K. A. Willets, and R. P. V. Duyne, "Localized Surface Plasmon Resonance Spectroscopy and Sensing," Annu. Rev. Phys, Chem. 58, 267-297 (2007)

[7] M. L. Brongersma, and P. G. Kik, *Surface Plasmon nanophotonics* (Springer, 2007)

[8] J. Oh, Y. W. Chang, H. J. Kim, S. Yoo, D. J. Kim, S. Im, Y. J. Park, D. Kim, and K. –H. Yoo, "Carbon Nanotube-Based Dual-Mode Biosensor for Electrical and Surface Plasmon Resonance Measurements," Nano Lett. 10(8), 2755-2760 (2010)

[9] J. W. Ko, J. –M. Woo, J. Ahn, J. H. Cheon, J. H. Lim, S. H. Kim, H. Chun, E. Kim, and Y. J. Park, "Multi-Order Dynamic Range DNA Sensor Using a Gold Decorated SWCNT Random Network," ACS Nano 5(6), 4365-4372 (2011)

[10] K. S. Kim, Y. Zhao, H. Jang, S. Y. Lee, J. M. Kim, K. S. Kim, J. –H. Ahn, P. Kim, J. –Y. Choi, and B. H. Hong, "Large-Scale Pattern Growth of Graphene Films for Stretchable Transparent Electrodes." Nature 457, 706-710 (2009)

[11] A. Fujiwara, Y. Matsuoka, H. Suematsu, N. Ogawa, K. Miyano, H. Kataura, Y. Manuwa, S. Suzuki, and Y. Achiba, "Photoconductivitiy in Semiconducting

Single-Walled Carbon Nanotubes," Jpn. J. Appl. Phys. 40, L1229-1231 (2001)

[12] I. A. Levitsky, and W. B. Euler, "Photoconductivitiy of single-wall carbon nanotubes under continuous-wave near-infrared illumination," Appl. Phys. Lett. 83(9), 1857-1859 (2003)

[13] M. Freitag, Y. Martin, J. A. Misewich, R. Martel, and Ph. Avouris, "Photoconductivitiy of Single Carbon Nanotubes," Nano Lett., Vol. 3, No. 8, 1067-1071, 2003

[14] Jianbo Zhang, Ning Xi, King W. C. Lai, Hongzhi Chen, and Yilun Luo, "Single Carbon Nanotube based Photodiodes for Infrared Detection," in Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Nanotechnology, pp. 1156-1160, 2007

[15] A. Kongkanand, R. M. Dominguez, and P. V. Kamat, "Single Wall Carbon Nanotube Scaffolds for Photoelectrochemical Solar Cells. Capture and Transport of Photogenerated Electrons," Nano Lett. 7(3), 676-680 (2007)

[16] P. V. Kamat, "Quantum Dot Solar Cells. Semiconductor Nanocrystals as Light Harvesters," J. Phys. Chem. C 112(48), 18737-18753 (2008)

[17] S. Linic, P. Christopher, and D. B. Ingram, "Plasmonic-metal nanostructures for efficient conversion of solar to chemical energy," Nature mater. 10, 911-921 (2011)

[18] S. Link, and M. A. El-Sayed, "Spectral Properties and Relaxation Dynamics of Surface Plasmon Electronic Oscillations in Gold and Silver Nanodots and Nanorods," J. Phys. Chem. B 103, 8410-8426 (1999)

[19] M. Hu, J. Chen, ZY. Li, L. Au, G. V. Hartland, X. Li, M. Marquez, and Y. Xia, "Gold nanostructures: engineering their plasmonic properties for biomedical applications," Chem. Soc. Rev. 35, 1084-1094 (2006)

[20] D. W. Kim, G. S. Choe, S. M. Seo, J. H. Cheon, H. Kim, J. W. Ko, I. Y. Chung, and Y. J. Park, "Self-gating effects in carbon nanotube network based liquid gate field effect transistors," Appl. Phys. Lett. **93**, 243115 (2006)

Abstract

Observation of metal work function modulation by surface plasmon resonance

Hyewon Shim

Department of Electrical and Computer Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The carbon nanotube network device with the gold nanoparticles shows the unique electric responses to the light illumination. This experimental observation can be explained as the modulation of the metal work function by the surface plasmon resonance.

The device consists of two gold electrodes, called the source and the drain, with a concentric structure. The 15 μm–long channel is formed with semiconducting carbon nanotube network or graphene between two electrodes. Gold nanoparticles with diameters of about 10 nm are deposited on the channel. 0 V or DC bias is applied to the source and the drain, and device characteristics are measured under various wavelength conditions with the light on/off pulses.

The important points are summarized as follows. (i) The current responses appear only in the light on/off transition state, and it is different from normal photoelectric effects. (ii) The carbon nanotube network device with the gold nanoparticles shows the high transient current compared to the graphene devices. (iii) The amount of cumulated charge and discharge varies significantly depending

on the wavelength. This is in agreement with the spectral response of the gold nanoparticle by the surface plasmon resonance as it is known. (iv) The current of the source and the drain is not just the charging/discharging current, but the unidirectional current. From this observation,

Electric responses of the device cannot be explained as the simple photoelectric effect or the charging current of the CMOS image sensor device. It may be the first observation of the metal work function modulation by the surface plasmon resonance in the electrical devices. These phenomena can be applied in a new sensor platform which can capture some effects by the surface plasmon resonance. The origin of the circulating current is an open question which calls more theoretical analysis and additional experiments as a future study.

Keywords : work function, surface plasmon resonance, gold nanoparticle, Schottky junction

Student Number : 2013-20815