



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0080965
(43) 공개일자 2017년07월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/28 (2006.01) G01R 31/26 (2014.01)
(52) CPC특허분류
G01R 31/2879 (2013.01)
G01R 31/2601 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0191113
(22) 출원일자 2015년12월31일
심사청구일자 2015년12월31일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
김경록
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
박중률
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인 무한

전체 청구항 수 : 총 5 항

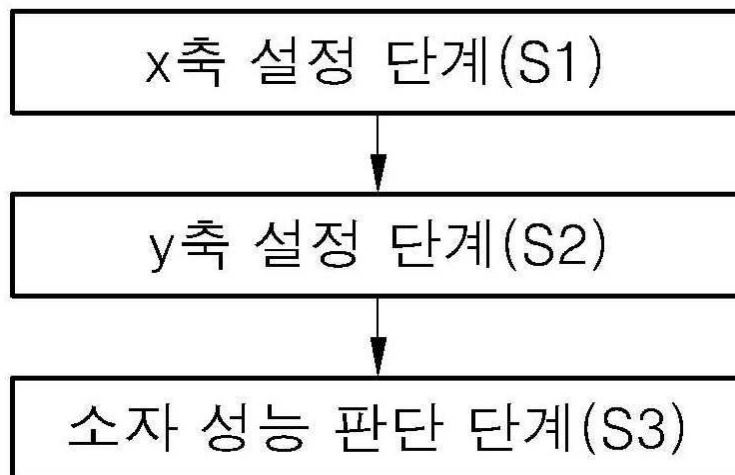
(54) 발명의 명칭 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법

(57) 요약

본 발명을 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 물리적 특성을 이용하여 해당 소자의 테라헤르쯔 발진 가능성을 평가하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법을 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

상기의 목적을 달성하기 위하여 본 발명은, 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법에 있어서, 전자 표류 속도를 x축으로 설정하는 x축 설정 단계; 플라즈마파 속도를 y축으로 설정하는 y축 설정 단계; 및 전자 표류 속도에 따른 플라즈마파 속도의 관계식과 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 플라즈마파 발생 조건을 이용하여 디자인 윈도우를 생성하여 소자의 동작을 판단하는 소자 성능 판단 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

G01R 31/2607 (2013.01)

G01R 31/2856 (2013.01)

(72) 발명자

김성호

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50

정유정

울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 (반연리)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 1711023935

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 첨단융합기술개발

연구과제명 나노-상보형금속산화반도체 기반 테라헤르츠 플라즈마파 트랜지스터 기술 연구

기 여 율 1/1

주관기관 울산과학기술대학교

연구기간 2015.03.01 ~ 2016.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법에 있어서,

전자 표류 속도를 x축으로 설정하는 x축 설정 단계;

플라즈마파 속도를 y축으로 설정하는 y축 설정 단계; 및

전자 표류 속도에 따른 플라즈마파 속도의 관계식과 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 플라즈마파 발생 조건을 이용하여 디자인 윈도우를 생성하여 소자의 동작을 판단하는 소자 성능 판단 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서, 상기 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 플라즈마파 발생 조건은 주파수 조건, 증가 조건 및 불안정 조건을 포함하는 것을 특징으로 하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법.

청구항 3

청구항 2에 있어서, 상기 증가 조건은 이상적인 드레인 임피던스 및 유한 임피던스를 구분하여 판단하는 것을 특징으로 하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법.

청구항 4

청구항 3에 있어서, 상기 유한 임피던스에서 증가 조건은 ω' 값을 고정한 주파수 조건과 교점을 이용하는 것을 특징으로 하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법.

청구항 5

청구항 2에 있어서, 소자 성능 판단 단계는 채널 길이를 z축으로 설정하는 z축 설정단계를 더 포함하여, 3차원 형상의 디자인 윈도우를 이용하여 소자 성능을 판단하는 것을 특징으로 하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 디자인 윈도우를 이용한 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 테라헤르츠파는 100GHz~10THz 대역의 미개발 주파수 자원으로 전자기파 스펙트럼에서 적외선과 밀리미터파의 중간 영역으로서, 현재 기술 수준으로는 진입 장벽이 매우 높기 때문에 일종의 테라헤르츠 갭으로 인식되는 미개척 기술 분야이다. 테라헤르츠파 기술은 처음에는 주로 광학적 영역이었으나, 차츰 나노급 전자 소자/소재 기술

이 발달하면서 광공학 기술과 전자공학 기술이 혼재하는 양상으로 전개되고 있다.

- [0003] 전자공학 기술로는 RTD(resonant tunneling diode), SBD(schottky barrier diode) 등의 수동 소자에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, III-V HBT, HEMT 소자는 최근 차단 주파수 1 THz까지 접근하며 Sub-THz 동작이 가능하게 되었다. 한편, 광공학 기술로는 광전도 스위치, 광정류, 차주파수 발생(DFG), 광파 라메트릭, 테라헤르츠 양자폭포 레이저(THz-QCL) 및 일방 캐리어 포토다이오드(UTC-PD) 등과 같은 소자의 개발이 현실화되면서 테라헤르츠 기술을 더욱 견인하고 있다.
- [0004] 현재의 나노 트랜지스터 기술은 더욱 더 높은 동작 주파수를 위해 지속적으로 20nm까지 스케일 다운되고 있지만, 트랜짓 모드(transit-mode)에서의 채널 축소화만으로는 500 GHz 이상의 대역에서 동작하기에 한계가 있다. 이를 극복하기 위한 새로운 개념의 소자인 플라즈마파 트랜지스터(plasma wave transistor, PWT)는 채널 전자 밀도의 시공간 진동파로 정의되는 플라즈마파(plasma-wave)를 이용하여 트랜짓 모드 전자 표류 속도의 10~100 배 속도로 동작이 가능하다. 이러한 2D 채널 전자 밀도의 플라즈마 공진 현상을 이용해 트랜지스터의 차단 주파수보다 높은 주파수 영역에서 동작하는 테라헤르츠 발진 및 검출용 플라즈마파 트랜지스터에 대한 소자 연구는 테라헤르츠 갭을 메우기 위한 기술로써 전세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.
- [0005] 플라즈마파 트랜지스터를 이용한 테라헤르츠 발진 및 검출 소자 연구는 1993년 미국 RPI의 Michael Shur 교수가 처음 제시한 이후에, 20년간 구현 및 응용에의 연구가 미국, 일본, 유럽의 대학을 중심으로 진행되고 있으나, 여전히 상용화 수준에 이르는 테라헤르츠 소자 및 특성을 평가하는데 기술적 어려움이 존재한다.
- [0006] 한편, Terahertz Emitters, Detectors and Sensors: Current Status and Future Prospects, M. Ghanashyam Krishna, Sachin D. Kshirsagar and Surya P. Tewari, intech.와 Terahertz Resonant Detection by Plasma Waves in Nanometric Transistors, F. Teppe, A. El Fatimy, S. Boubanga, D. Seliuta, G. Valusis, B. Chenaud and W. Knap, Proceedings of the 13th International Symposium UFPS.에는 플라즈마파를 위한 공진기를 이용하여 테라헤르츠 범위 내에 도달할 수 있는 기술적 개요와 드레인-소스 전류나 플라즈마파의 주파수에 관한 상관관계 내지 플라즈마파의 속도 및 드리프트 속도의 관계를 이론적으로 풀이하고 있다.
- [0007] 상기 선행기술들의 이론을 이용한 플라즈마파 트랜지스터의 성능을 평가하는 방법이 본 출원인에 의하여 출원되어 등록특허 제1521116호로 등록된 바가 있다. 상기 특허는 공진형 플라즈마파 트랜지스터를 그 대상으로 하고 있으며, 테라헤르츠 발진기로 적용 특성을 평가하는 것을 특징으로 하고 있다.
- [0008] 한편, 본 출원인은 기존 공진형 플라즈마파 트랜지스터의 단점을 극복한 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터(SC-PWT, suspended channel plasma wave transistor)를 제안하였으며, 상기 구성을 기초로 발진기 및 검출기의 구성을 특허 제2014-0193098호로 출원한 바 있다.
- [0009] 상기 SC-PWT(또는 SC-PWD, suspended channel plasma wave device)의 경우에는 공진형 플라즈마파 트랜지스터와 기본적인 특성에서 차이가 있어 종래 평가 방법을 통하여 소자의 특성을 평가하기에 부적절하여 새로운 방식의 평가 방법이 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은 상기와 같은 필요에 의하여 안출된 것으로, 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 물리적 특성을 이용하여 해당 소자의 테라헤르츠 발진 가능성을 평가하는 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법을 제공하는 것을 그 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0011] 상기의 목적을 달성하기 위하여 본 발명은, 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법에 있어서, 전자 표류 속도를 x축으로 설정하는 x축 설정 단계; 플라즈마파 속도를 y축으로 설정하는 y축 설정 단계; 및 전자 표류 속도에 따른 플라즈마파 속도의 관계식과 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 플라즈마파 발생 조건을 이용하여 디자인 윈도우를 생성하여 소자의 동작을 판단하는 소자 성능 판단 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0012] 더욱 바람직하게는, 상기 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 플라즈마파 발생 조건은 주파수 조건, 증가 조건 및 불안정 조건을 포함하는 것을 특징으로 한다.

- [0013] 더욱 바람직하게는, 상기 증가 조건은 이상적인 드레인 임피던스 및 유한 임피던스를 구분하여 판단하는 것을 특징으로 한다.
- [0014] 더욱 바람직하게는, 상기 유한 임피던스에서 증가 조건은 ω' 값을 고정한 주파수 조건과 교점을 이용하는 것을 특징으로 한다.
- [0015] 바람직하게는, 소자 성능 판단 단계는 채널 길이를 z축으로 설정하는 z축 설정단계를 더 포함하여, 3차원 형상의 디자인 윈도우를 이용하여 소자 성능을 판단하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0016] 본 발명에 따른 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법은 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 평가에 있어서 이미션 성능에 영향을 미치는 성능 파라미터를 선정하여 이들 간의 관계를 도출하고, 실험 전에 이미터가 이론적으로 어떠한 성능을 발휘할 것인지를 검사할 수 있는 디자인 윈도우를 설계함으로써, 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터가 테라헤르츠 발진기로서 동작할 수 있는지를 용이하게 평가할 수 있으며, 반도체 소자에 활용될 수 있는 다양한 물질들에 대한 이미터 성능 평가를 통해 새로운 소재를 활용한 서스펜디드 채널 플라즈마파 테라헤르츠 이미터 개발을 제안할 수 있는 효과를 제공한다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 본 발명에 따른 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법의 절차도이며,
 도 2는 주파수 조건에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 3은 증가 조건에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 4는 유한 임피던스를 갖는 증가 조건에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 5는 불안정 조건에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 6은 전체 조건에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 7은 실시예 1에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 8은 실시예 2에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 9은 실시예 3에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 10은 실시예 4에 따른 디자인 윈도우 그래프이며,
 도 11은 실시예 5에 따른 디자인 윈도우 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 이하 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 첨부한 도면을 참조하여 구체적으로 설명한다.
- [0019] 또한, 본 발명에 따른 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법은 아래 비특허 문언에서 제안된 관계식을 이용하여 필요한 수학적식을 유도하여 디자인 윈도우(design window)를 도출한다.
- [0020] 비특허문헌 1: Michel Dyakonov, Laboratoire de Physique Theorique et Astroparticules, cc 070, Univesite Montpellier H, 34095 Montpellier, France
- [0021] 비특허문헌 2: Michael S. Shur, Rensselaer Polytechnic Institute, CII-9017, ECSE and Broadband Data Transport Center, Try, New York 1218
- [0022] 비특허문헌 3: M. V. Cheremisin, Solid-State Electronics 52, 338 (2008)
- [0023] 먼저, 2차원 SC-PWD에서 확산 관계(disperstion relation)와 플라즈마파 속도(velocity of plasma-wave)는 비특허문헌 1 및 비특허문헌 2의 관계식, 채널 내부 플라즈마파 관계식, 오일러 식과 연속 방정식을 이용하는 경우 다음과 같이 유도된다.

채널 내부 플라즈마파

$$n_1(x,t) = (C_+ e^{ik_+x} + C_- e^{ik_-x}) e^{-i\omega t}$$

$C_{\pm}$: perturbation coefficient
for downstream and upstream

$k_{\pm}$: wave number
for downstream and upstream

ω : angular frequency

[0024]

[0025] 수학식 1:

$$\omega = kv_0 \pm \sqrt{\frac{e^2 kn_0}{2m\varepsilon}}$$

[0026]

[0027] 수학식 2:

$$s_{\pm} = \frac{\omega}{k} = v_0 \pm \sqrt{\frac{e^2 n_0}{2m\varepsilon}} \frac{\sqrt{k}}{k} = v_0 \pm \sqrt{\frac{e^2 n_0}{2m\varepsilon k_{\pm}}}$$

[0028]

[0029] 여기서, ω 는 각속도, e 는 전하량, k 는 파수(wave number), v 는 전자 표류 속도, n_0 은표면 전자 밀도, $k_{\pm}$ 는 각각 하류(downstream)와 상류(upstream)에 대한 파수, ε 는 2D 채널물질의 유전 상수, $S_{\pm}$ 은 플라즈마파 속도를 의미한다.

[0030] 그리고 $k_{\pm}$ 는 비특허문헌 3에 개시된 파수와 주파수의 관계식을 이용하는 경우 다음 수학식 3과 같이 유도된다.

[0031] 수학식 3:

$$k_+ = \frac{1 + \frac{\omega' v_0}{\alpha} - \sqrt{1 + 2 \frac{\omega' v_0}{\alpha}}}{v_0^2 / \alpha} \quad \alpha = \frac{e^2 n_0}{4m\varepsilon}$$

$$k_- = -\frac{1 - \frac{\omega' v_0}{\alpha} - \sqrt{1 - 2 \frac{\omega' v_0}{\alpha}}}{v_0^2 / \alpha}$$

[0032]

[0033] 여기서, α 는 플라즈마파의 가속도 성분이며, 각주파수(Angular frequency $\omega' + i\omega''$)는 다음과 같이 유도된다.

[0034] 수학식 4:

$$\omega' = \frac{\alpha}{2v_0} \sqrt{1 - \frac{1}{4} \left\{ \left(2 - \frac{v_0^2}{\alpha L} N\pi \right)^2 - 2 \right\}^2} \quad \omega'' = \frac{v_0 \sqrt{1 - \left(2 \frac{\omega' v_0}{\alpha} \right)^2}}{l \left(\sqrt{1 + 2 \frac{\omega' v_0}{\alpha}} - \sqrt{1 - 2 \frac{\omega' v_0}{\alpha}} \right)} \ln |R_{n,d}| - \frac{1}{2\tau_p}$$

[0035]

[0036] 여기서 $\omega'' > 0$ 이면 플라즈마파 증폭이 시작된다.

[0037] 그리고 드레인 반사 계수는 드레인 경계 조건 임피던스값을 Z_d 인 경우 수학식 5와 같이 유도됩니다.

[0038] 즉, 다음 식을 이용하여,

$$j_1(L) = \frac{\Psi(L)}{|Z_d|W} = e \left(\frac{\omega}{k_+} C_+ e^{ik_+L} + \frac{\omega}{k_-} C_- e^{ik_-L} \right) \quad \Psi: \text{self electric potential}$$

[0039]

[0040] 정리하면,

[0041] 수학식: 5

$$r_d = r_{d,i} - \frac{r_{d,i} + 1}{(1 - 2|Z_d|W\varepsilon\omega)e^{ik_+L}} \quad r_{d,i} = \frac{1 - \frac{\omega'v_0}{\alpha} - \sqrt{1 - 2\frac{\omega'v_0}{\alpha}}}{1 + \frac{\omega'v_0}{\alpha} - \sqrt{1 + 2\frac{\omega'v_0}{\alpha}}}$$

[0042]

[0043] 한편, SC-PWD는 다음 표 1과 같은 조건 하에서 테라헤르쯔 소자로 동작한다.

[0044] 표 1

Physical Conditions for Plasma-Wave	Criteria
Instability	$v_0 < v_{inj} < s$
Increment	$\omega'' > 0$
Frequency	$f < 10 \text{ THz}$

[0045]

[0046] 즉, SC-PWD의 플라즈마파가 발생할 판정 기준은 불안정(instability), 증가(increment) 및 주파수(frequency) 조건이다. 따라서, SC-PWD는 상기 표 1의 조건 하에서 테라헤르쯔 발진기로 동작하며, 상기 조건을 각 파라미터에 대하여 살펴본다.

[0047] 그리고 n 를 도입하는 경우, 플라즈마파 속도와 전자 표류 속도와의 관계를 나타내는 기본식은 수학식 6으로 정리된다.

[0048] 수학식: 6

$$s_+ = \left[1 + \sqrt{\frac{2}{1 + \eta - \sqrt{1 + 2\eta}}} \right] v_0$$

$$\eta = \frac{\omega v_0}{\alpha}$$

[0049]

[0050] 이하 본 발명에 따른 서스펜디드 채널 플라즈마파 트랜지스터의 성능 평가 방법은 도 1에 도시된 바와 같이, 전자 표류 속도를 x축으로 설정하는 x축 설정 단계(S1), 플라즈마파 속도를 y축으로 설정하는 y축 설정 단계(S2) 및 전자 표류 속도에 따른 플라즈마파 속도의 관계를 나타내는 디자인 윈도우를 생성하여 소자의 동작을 판단하는 소자 성능 판단 단계(S3)를 포함하여 구성된다.

[0052] 이하 각 단계에 대하여 설명한다.

[0054] **x축 설정 단계(S1)**

[0056] 디자인 윈도우는 x축, y축 및 필요한 경우 z축을 포함한다.

[0057] 이때 x축은 전자 표류 속도 v_0 로 설정한다. 상기 v_0 는 0에서 점차적으로 증가시킨다.

[0059] y축 설정 단계(S2)

[0061] 디자인 윈도우의 y축을 설정하는 단계로 y값은 x값의 변화에 따라 변화되며, 이때 y축은 플라즈마파 속도 s_+ 로 설정한다.

[0063] 소자 성능 판단 단계(S3)

[0065] 소자 성능 판단 단계(S3)는 v_0 값과 소자 파라미터인 채널 길이 L, 채널 너비 W, 이동도 μ , 드레인 임피던스 Z_d 의 변화에 따른 디자인 윈도우를 생성하여 이미터의 동작 범위를 판단하는 단계로, 표 1의 3가지 조건을 적용하여 소자의 동작 범위를 판단한다.

[0067] 1. 주파수 조건(frequency condition $f < 10$ THz)

[0068] 수학적 식 4와 수학적 식 6을 이용하는 경우, 각 주파수 조건에서 플라즈마파 속도와 전자 표류 속도의 관계는 수학적 식 7과 같이 유도된다.

[0069] 수학적 식 7:

$$s_+ = \left[1 + \sqrt{\frac{2}{1+\eta - \sqrt{1+2\eta}}} \right] v_0 \quad N=1$$

$$v_0 = \frac{\omega' l}{\eta \pi} \left[2 - \sqrt{2 + 2\sqrt{1 - (2\eta)^2}} \right]$$

[0070]

[0071] 이때 주파수 크기에 따른 플라즈마파 속도와 전자 표류 속도 관계는 도 2와 같은 그래프로 도시된다.

[0073] 2. 증가 조건 (increment condition, $\omega'' = 0$)

[0074] $\omega'' = 0$ 은 $rd=rd$, $i=rd$, c 가 되는 지점을 의미하므로, 수학적 식 4 및 수학적 식 6을 이용하고, 다음과 같은 수학적 식 8이 유도된다.

[0075] 수학적 식 8:

$$v_0 = \frac{(\sqrt{1+2\eta} - \sqrt{1-2\eta})l}{2\tau_p \sqrt{1-(2\eta)^2} \ln \left[\frac{1-\eta - \sqrt{1-2\eta}}{1+\eta - \sqrt{1+2\eta}} \right]}$$

$$s_+ = \left[1 + \sqrt{\frac{2}{1+\eta - \sqrt{1+2\eta}}} \right] v_0$$

[0076]

[0077] 상기 수학적 식 8을 이용한 경우 도 3과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

[0079] 3. 증가 조건- 유한 Z_d (increment condition, $\omega'' = 0$)

[0080] 역시 $\omega'' = 0$ 은 $rd=rd$, $i=rd$, c 가 되는 지점을 의미하므로, 수학적 식 4 및 수학적 식 6을 이용하고, 임피던스가 추가되

므로, 수학식 3을 추가하면, 다음과 같은 수학식 9가 유도된다.

수학식 9:

$$v_0 = \frac{(\sqrt{1+2\eta} - \sqrt{1-2\eta})L}{2r_p\sqrt{1-(2\eta)^2}} \left[\ln \left[\frac{1-\eta-\sqrt{1-2\eta}}{1+\eta-\sqrt{1+2\eta}} - \frac{\left(1+\frac{1-\eta-\sqrt{1-2\eta}}{1+\eta-\sqrt{1+2\eta}}\right) \cos \left[\frac{(1+\eta-\sqrt{1+2\eta})\pi}{2-\sqrt{2+2\sqrt{1-(2\eta)^2}}} \right]}{1-2|Z_d|W\epsilon\omega'} \right] \right]^{-1}$$

$$\eta = \frac{\omega v_0}{\alpha}$$

하지만, 상기 수학식 9는 ω' 를 포함하고 있어, η 변화만으로 윈도우를 도식할 수 없다. 따라서 별도의 식이 필요하면, 본 발명에서는 수학식 7과 수학식 9를 이용하며, 이때 $v_0-v_0'=0$ 의 조건이며, 이때 조건은 수학식 10으로 유도된다. 따라서, ω' 를 고정한 후, η 값을 수학식 10의 비선형 방정식으로 풀어 구한다.

수학식 10

$$\frac{\omega' \left[2 - \sqrt{2+2\sqrt{1-(2\eta)^2}} \right]}{\eta\pi} - \frac{(\sqrt{1+2\eta} - \sqrt{1-2\eta})L}{2r_p\sqrt{1-(2\eta)^2}} \left[\ln \left[\frac{1-\eta-\sqrt{1-2\eta}}{1+\eta-\sqrt{1+2\eta}} - \frac{1}{1-2|Z_d|W\epsilon\omega'} \left(1 + \frac{1-\eta-\sqrt{1-2\eta}}{1+\eta-\sqrt{1+2\eta}} \right) \cos \left[\frac{(1+\eta-\sqrt{1+2\eta})\pi}{2-\sqrt{2+2\sqrt{1-(2\eta)^2}}} \right] \right] \right]^{-1} = 0$$

수학식 10과 수학식 9를 이용하면, 도 4와 같은 그래프를 얻을 수 있다.

4. 불안정 조건(instability condition)

dc 전류원의 부가로 v_0 는 채널 전반에 걸쳐 상수값을 지닌다 가정하고, 이때 최대속도는 소스로부터 전자가 주입된 속도 v_{inj} 라 가정하며, 또한 v_0 는 플라스마파 속도 s 를 넘길 수 없는 상황으로 가정하면, 조건은 $v_0=v_{inj}$ 로 한정된다.

상기 불안정 조건을 부가한 그래프는 도 5와 같으며, 전체 2개의 조건을 종합하면, 도 6과 같은 최종 디자인 윈도우를 얻을 수 있다.

이하 본 발명을 실시예에 따라 더욱 상세히 설명한다.

실시예 1

이동도 10만 of suspended graphene ($m=0.02m_0$)을 L (길이)=300 nm, W (너비)= 1000 nm의 크기를 지나는 채널 물질을 사용시 SC-PWD THz 이미터의 디자인 윈도우의 변화를 $|Z_d|$ 에 따라 나타낸 그래프를 도 7에 도시하였다.

실시예 2

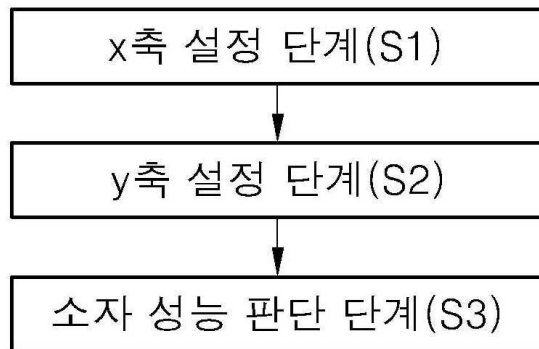
이동도 변화에 따른 디자인 윈도우의 변화를 도 8에 도시하였다. 상기 도 8에 도시된 바와 같이, 높은 이동도에서 비교적 넓은 디자인 자유도를 가지는 것으로 분석되었다.

실시예 3

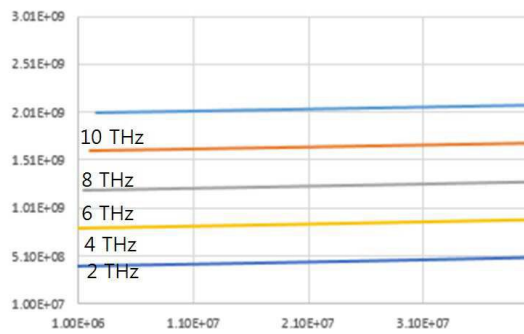
동일한 이동도를 지닐 때 채널길이에 대하여 변화되는 디자인 윈도우를 도 9에 도시하였다. 동일한 min. h 를 공

도면

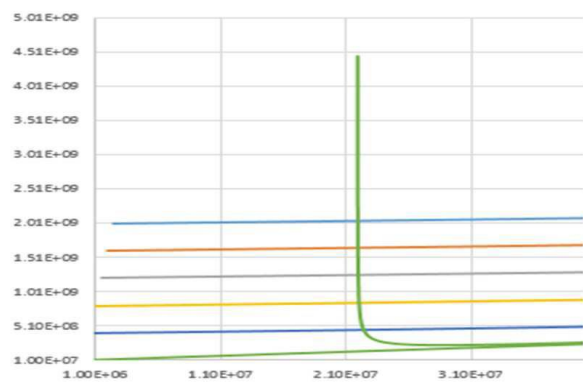
도면1



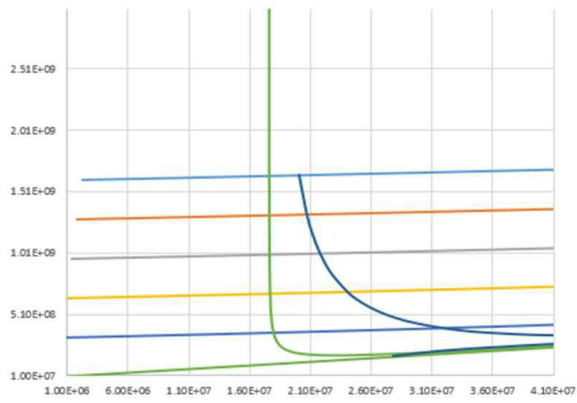
도면2



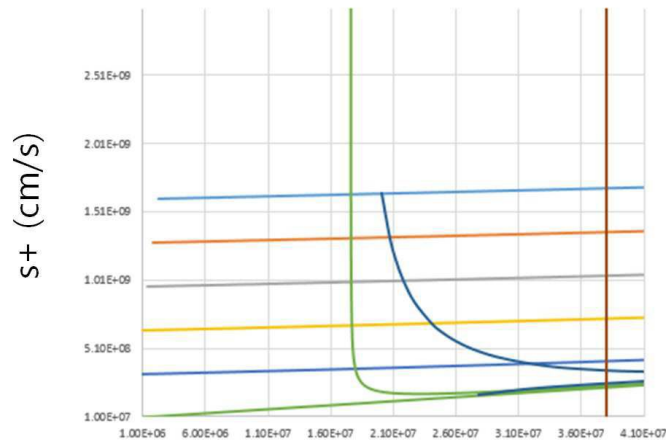
도면3



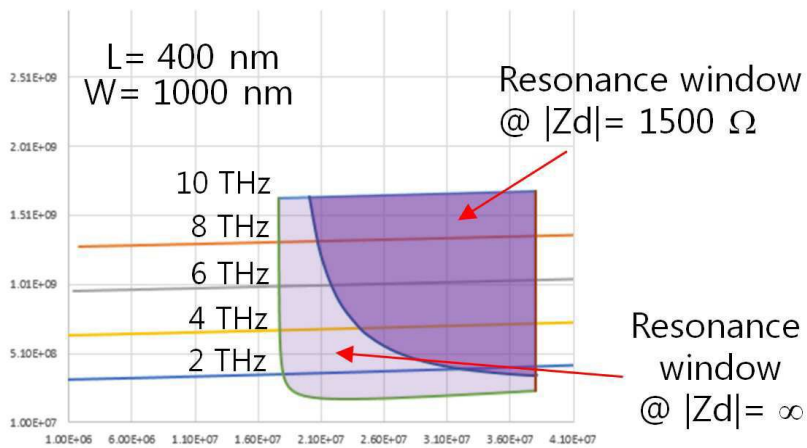
도면4



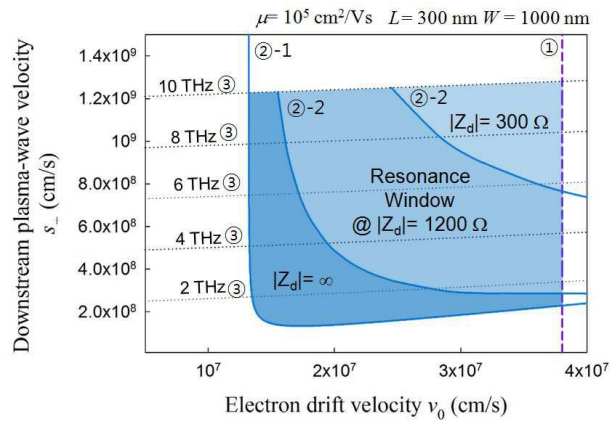
도면5



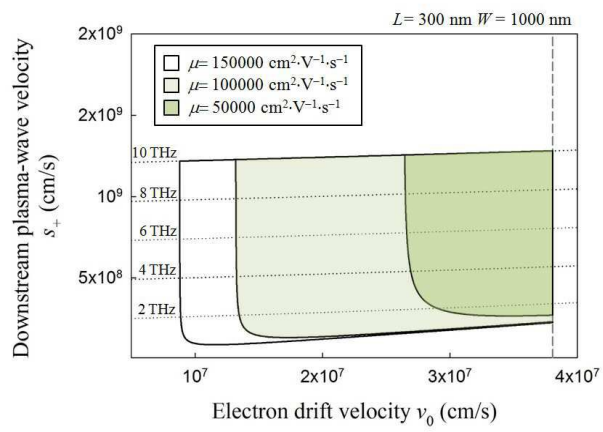
도면6



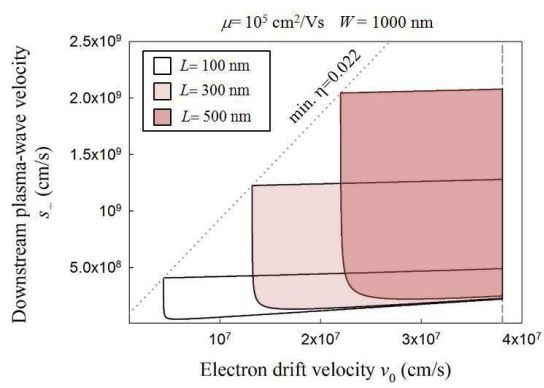
도면7



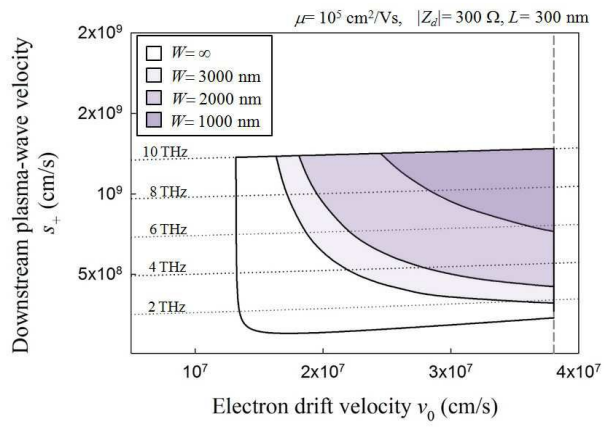
도면8



도면9



도면10



도면11

