

論文2002-39SD-10-2

속도 오버슈트 효과를 이용하여 서브밀리미터파 주파수 영역에서 동작하는 주행 시간 다이오드

(Transit Time Diodes Using Velocity Overshoot Effects for Submillimeter-Wave Frequency Range Operation)

宋仁彩 *

(Inchae Song)

요 약

드리프트 영역에서의 속도 오버슈트 효과를 이용하여 서브밀리미터파 주파수 영역에서 동작하는 새로운 주행 시간 소자를 제안한다. 이 소자를 속도 오버슈트 주행 시간 (VOTT) 다이오드라 명명한다. 이 소자는 캐리어 주입 메커니즘으로 빠르게 이루어지는 이중구조 터널링을 이용하며, 속도 오버슈트 효과를 최적화하기 위하여 짧은 드리프트 영역을 갖는다. 변환효율을 증대시키기 위하여 에너지 대역 간극을 경사시키는 방법으로 드리프트 영역을 설계한다. 모의실험결과에 따르면 이 소자는 THz 영역에서 동작하리라 기대된다.

Abstract

We propose a new transit time device to extend the operating frequency to submillimeter-wave (extreme infrared) ranges by utilizing velocity overshoot effects in the drift region. We name it a velocity overshoot transit time (VOTT) diode. This device adopts fast heterostructure tunneling as injection mechanism and a short drift region to optimize the velocity overshoot effects. To enhance dc-to-RF conversion efficiency, the drift region is designed with a bandgap grading method. Simulation results demonstrate that a VOTT diode can be operated at THz ranges.

I. 서 론

최근 정보통신 기술의 비약적 발전에 따라 다양한 정보통신시스템과 이를 이용한 서비스가 개발 보급되고 있다. 특히 이동통신의 급속한 보급에 힘입어 무선 통신 이용이 활성화되고 있으며 전파를 이용하여 저렴한 비용으로 기존의 유선통신망을 보완하거나 대체할 수 있는 광대역 무선 멀티미디어 시스템도 개발 보급되고 있다. 이와 같이 전파 자원에 대한 수요가 지속적으로 증가함에 따라 마이크로파 대역 이하의 주파수 사용이 포화상태에 이르렀다. 이에 대한 해결책으로

새로운 주파수 자원인 밀리미터파 대역에 관한 관심이 고조되어짐에 따라 밀리미터파 기술이 중요시되고 있다. 적절한 밀리미터파 source의 개발이 앞으로의 밀리미터파 기술 발전에 있어서 중요한 관건이 되고 있다. 밀리미터파의 상위 주파수 대역에서 충분한 출력을 내는 coherent source를 실현하는 일은 어려운 과제이다.

전형적인 2단자 마이크로파 반도체 소자로는 주행 시간 (transit time) 다이오드와 TED (Transferred-Electron Device)를 들 수 있다. TED는 동작 메커니즘의 속성인 유한 응답 시간 (finite response time) 때문에 동작 주파수 범위가 150 GHz를 넘기가 어렵다.^[1] 대표적 주행 시간 다이오드인 IMPATT (Impact Ionization Avalanche Transit Time) 다이오드의 경우 avalanche에 의한 캐리어 분산 (dispersion) 효과와 캐리어 확산 효과 때문에 높은 주파수 대역에서의 동작

* 正會員, 崇實大學校 情報通信電子工學部

(School of Electronic Engineering, Soongsil Univ.)

接受日字:2002年5月8日, 수정완료일:2002年9月30日

이 제한되어진다.^[1,2] 또한 IMPATT은 본질적으로 고잡음 소자이다. 열에너지에 의하여 캐리어가 전위 장벽을 넘어 주입되는 BARITT (Barrier Injection and Transit Time) 다이오드는 주입 영역 부근의 높은 확산도와 낮은 드리프트 (drift) 속도 때문에 동작 주파수가 제한된다.^[1] 주입 영역에서 고유 (intrinsic) 주파수 응답 시간을 빠르게 하고 잡음을 줄이기 위해서는 주입 메커니즘으로 터널링 (tunneling) 이 바람직하다.

최근 들어 마이크로파와 밀리미터파 영역 및 초고속 스위칭 분야에서 사용되어지는 반도체 소자에 대한 관심이 고조되어지고 있다. 특히 전위 장벽의 양자역학적 터널링을 이용하는 이종구조 (heterostructure)에 대해 다양하게 탐구되었다.^[3-6] 공명 터널링 다이오드 (resonant tunneling diode)를 통해 650 GHz에서의 발진과 2.5 THz 까지 주파수 혼합이 이루어졌다.^[5,6] 공명 터널링 다이오드의 소자 특성을 개선하기 위하여 QWITT (quantum-well injection transit time) 다이오드가 제안되어졌다.^[7] 이러한 소자들은 짧은 드리프트 영역을 갖고 있어 과도 (transient) 현상인 속도 오버슈트 (velocity overshoot) 효과가 매우 중요하다.^[8,9] 드리프트 영역으로 들어가는 캐리어는 속도 오버슈트를 겪게 되는데 이런 과도 현상은 수 ps 동안 유지되어 캐리어가 수천 Å 이동하게 된다.^[10,11]

속도 오버슈트를 이용하여 동작 주파수를 서브밀리미터파 영역까지 확대하는 새로운 주행 시간 소자를 제안한다. 이러한 소자를 VOTT (velocity overshoot transit time) 다이오드라 명명한다. 이 소자는 캐리어 주입 메커니즘으로 빠르게 이루어지는 이종구조 터널링을 이용하며, 속도 오버슈트 효과를 최적화하기 위하여 짧은 드리프트 영역을 갖는다. 변환효율을 증대시키고 드리프트 영역의 길이를 적절히 조절하기 위하여 에너지 대역 간극을 경사시키는 방법으로 드리프트 영역을 설계한다.^[12] 이 소자는 터널 다이오드, 공명 터널링 다이오드, QWITT 다이오드와 같이 부저항 (negative differential resistance) 특성을 이용하는 소자의 경우 발생할 수 있는 불안정성의 문제없이 연속적으로 집적이 가능하여 출력을 증대시킬 수 있을 것이다.

II. 소자의 설계

제안된 소자는 다른 주행시간 소자와 마찬가지로 인

젝터와 드리프트 영역으로 구성된다. 이 소자의 동작 메커니즘은 TUNNETT (Tunnel Injection Transit Time) 다이오드와 유사하다.^[2] 그러나 이 소자는 TUNNETT 다이오드의 에너지 밴드간 (band to-band) 터널링 방식이 아닌 이종구조 전위장벽 터널링을 통한 국부적 주입 방식을 채택하여 TUNNETT에서 피하기 어려운 충돌 이온화 (impact ionization)에 따른 잡음 문제를 해소하였다. 나아가 속도 오버슈트 효과를 이용하여 동작주파수를 높이기 위하여 TUNNETT 다이오드보다 훨씬 짧은 드리프트 영역을 갖도록 설계하였다.

서브밀리미터파 동작을 위해서는 단일 전위장벽이 인젝터로 고려되어진다. 단일 전위장벽이 이중 전위장벽에 비해 터널링 시간이 빠르므로 보다 나은 고주파 응답을 기대할 수 있을 뿐만 아니라 제조하기도 상대적으로 수월하다. 인젝터 설계에 있어 또 다른 고려 사항은 주입되는 캐리어가 지나치게 높은 에너지를 가져서는 안 된다는 것이다. 드리프트 영역에서의 속도 오버슈트 build-up이 서브밀리미터파 주파수 영역에서의 동작에 중요한 역할을 한다. 높은 에너지로 주입되는 캐리어는 초기 속도가 높아 속도 오버슈트 build-up을 저해한다.^[11] 나아가 인젝터는 터널링 전류를 형성할 만큼 적절한 양의 캐리어를 주입할 수 있어야 한다. 이와 같은 요구를 충족시키기 위해서 삼각형 모양의 단일 전위장벽 구조를 인젝터로 선택하였다.

드리프트 영역은 속도 오버슈트 효과를 이용할 수 있도록 설계되어진다. 드리프트 영역 내의 도핑만 가지고 드리프트 영역의 길이를 조절하는 것은 쉽지 않다. 출력을 높이기 위해 드리프트 영역을 키우기 위해서는 도핑을 낮추거나 바이어스를 높여야 한다. 그러나 드리프트 영역의 도핑 농도를 낮추면 공간전하 효과로 인해 소자의 성능이 저하된다. 바이어스 전압을 높이면 속도 오버슈트의 build-up을 감소시킨다. 공간전하 효과를 억제하면서 원하는 드리프트 영역의 길이를 얻기 위하여 bandgap 경사 기술을 채택하였다. 또한 이 방법은 변환 효율을 증대시킨다.^[12] 속도 오버슈트의 build-up을 이용하는 것은 인젝터 근처에서의 캐리어 속도가 컬렉터 부근의 속도보다 훨씬 낮은 DOVETT (double velocity transit time)의 동작과 유사하다[1]. 그림 1은 예로서 설계된 VOTT 다이오드의 구조와 에너지 대역도를 보여준다. AlGaAs 물질을 사용하여 드리프트 영역에서 포물선 모양의 에너지 밴드 경사를 갖도록 설계하였다.

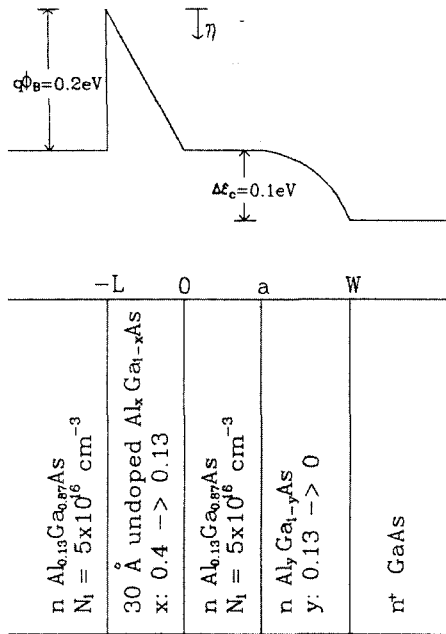


그림 1. 설계된 VOTT 다이오드의 구조 및 에너지 대역도

Fig. 1. A cross-sectional view of a design example of the VOTT diode with the corresponding schematic energy band diagram.

III. 모델링

먼저 인젝터 특성으로 전류밀도와 전계와의 관계식 (J-E transfer function)을 유도한다. 그림 1에 보여진 인젝터의 터널링 확률은 WKB (Wentzel-Kramers-Brillouin) 근사법으로 계산할 수 있다.^[11]

$$T_i = \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}\eta^{3/2}}{3q\hbar E_m}\right) \quad (1)$$

여기서 \hbar 는 reduced Planck 상수, q 는 전자 전하, m^* 는 전자 유효 질량이다. η 는 전위 장벽의 꼭대기를 기준으로 측정된 입사 전자 에너지 (incoming electron energy) 이고 E_m 은 인젝터에 걸리는 전체 유효 전계 (total effective electric field)로 다음과 같이 주어진다.

$$E_m = \frac{\phi_B}{L} + E_i \quad (2)$$

ϕ_B 는 장벽 전위 (barrier height potential), L 은 장벽 두

께 (barrier thickness), E_i 는 인젝터에 걸리는 인가 전계 (applied electric field) 이다. 캐리어는 인젝터 장벽을 가로질러 오른쪽으로 또는 왼쪽으로 이동한다. 각각에 대응되는 전류밀도를 $J_{i,r}$ 과 $J_{r,i}$ 로 표시하면 최종 터널링 전류밀도는 이 두 성분의 합으로 표현된다.

$$J = J_{i,r} - J_{r,i} \quad (3)$$

$$= \frac{A^*T}{k} \int_0^{\phi_B} T_i(F_i - F_r) d\eta$$

여기서 F_i 와 F_r 는 장벽의 왼쪽과 오른쪽에서의 Fermi-Dirac 분포 함수이다. A^* 는 유효 Richardson 상수, T 는 절대온도, k 는 Boltzmann 상수이다.

L 이 짧아지면 전류밀도가 증대된다. 그러나 지나치게 큰 전류밀도는 공간전하 효과가 심각하게된다. 더하여 삼각형 장벽의 두께를 작게 만드는 것은 쉽지 않은 일이다. 여기서는 이러한 점을 고려하여 장벽의 두께를 30 Å으로 선택하였다. 전체 전류는 열전자 전류를 포함한다. 그러나 열전자 주입은 에너지가 높으므로 가급적 열전자 전류를 낮추어야 한다. ϕ_B 가 0.1 eV보다 작으면 열전자 전류가 터널링 전류에 필적하게된다. 반면에 ϕ_B 가 커지면 전류밀도가 작아진다. 이러한 점을 고려하여 ϕ_B 를 0.2 eV로 선택하였다. 그림 2는 전위장벽 주위의 도핑 농도, N_i 에 따른 J-E 관계를 보여 준다. 그림 2에서 보여지듯이 N_i 이 낮으면 전류밀도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 반면에 장벽 주위의 도핑 농도가 높으면 도핑이 되어 있지 않는 장벽으로 불순물이 침투하게 되어 산란 (scattering)에 따른 터널링 응답 시간의 지연을 초래한다. 이런 측면에서 N_i 의 값을 $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 으로 선택하였다.

드리프트 영역의 도핑 농도는 드리프트 영역에서 캐리어가 포화 드리프트 속도를 얻는데 필요한 최소 전계, E_s 를 유지하도록 설계되어진다. 따라서 포물선 모양의 에너지 밴드 경사를 갖는 드리프트 영역의 도핑 농도는 다음과 같이 정해진다.^[12]

$$N_2 = \frac{2\varepsilon(\Delta\varepsilon_c/q)}{qb^2} \quad (4)$$

여기서 ε 는 유전율이고, $\Delta\varepsilon_c$ 는 전도대 경사 (conduction band grading) 양이며, b 는 드리프트 영역에서 성분비가 변화되는 부분의 폭으로 다음과 같이 주어진다.^[12]

$$b = W - a = W - \frac{\epsilon}{qN_1}(E_0 - E_s) \quad (5)$$

여기서 W 는 드리프트 영역의 폭이고 a 는 드리프트 영역에서 성분비의 변화가 없는 부분의 폭이며, E_0 는 RF 사이클 동안 드리프트 영역의 시작점에서 나타나는 최소 전계를 의미한다. 포화 드리프트 속도를 유지하는데 필요한 최소 전계인 E_s 는 1 kV/cm로 선택하였다. Γ - Γ 천이 (transition)를 유지하기 위해 $q\Phi_B + \Delta\epsilon c$ 가 0.34 eV를 초과하지 말아야하므로 $\Delta\epsilon c$ 는 0.1 eV로 선택하였다.^[13]

캐리어 속도와 확산의 과도 현상에 대해 이용 가능한 데이터를 사용하기 위해 바이어스 전계로 20 kV/cm를 채택하였다. 초기 주입 속도를 10^7 cm/s라 할 때 20 kV/cm의 전계하에서 속도 오버슈트는 식 (6)과 같이 근사되어지며 캐리어 확산 과도 현상은 식 (7)과 같이 주어진다.^[10]

$$v(t) = \begin{cases} 3 \times 10^8 t + 10^7 & 0 \leq t < 0.2 \text{ ps} \\ -2 \times 10^8 (t - 0.2) + 7 \times 10^7 & 0.2 \text{ ps} \leq t < 0.5 \text{ ps} \\ 10^7 & 0.5 \text{ ps} \leq t \end{cases} \quad (6)$$

$$D(t) = \begin{cases} 402t & 0 \leq t < 0.25 \text{ ps} \\ -770(t - 0.25) + 100.5 & 0.25 \text{ ps} \leq t < 0.4 \text{ ps} \\ 150(t - 0.4) - 15 & 0.4 \text{ ps} \leq t < 0.6 \text{ ps} \\ 15 & 0.6 \text{ ps} \leq t \end{cases} \quad (7)$$

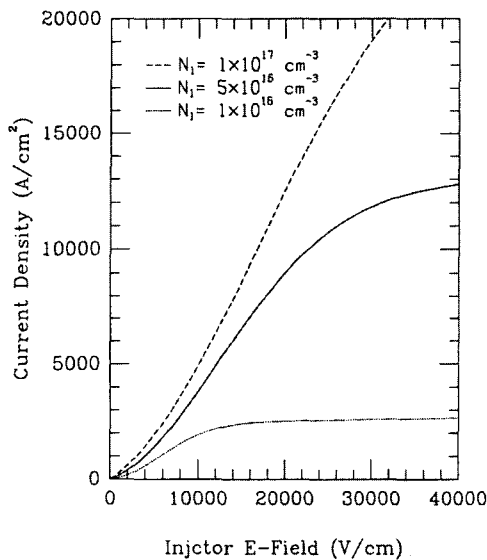


그림 2. 전위장벽 주위의 도핑 농도에 따른 전류밀도와 인젝터에 인가된 전계와의 관계
 Fig. 2. The current density versus applied E-field across the injector showing dependence upon doping density outside the barrier.

이와 같은 데이터를 가지고 속도 오버슈트와 캐리어 확산 효과를 포함하는 주행 시간 다이오드에 대한 해석적 모델을 적용하여 설계를 수행한다.^[8,14]

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

설계된 소자에 대해 속도 오버슈트 효과와 캐리어 확산 효과를 고려하여 시뮬레이션 하였다. 그림 3과 그림 4는 서브밀리미터파 주파수대에서 VOIT 동작에 대한 속도 오버슈트와 캐리어 확산 효과를 보여준다. 인젝터의 RF 진폭은 dc 바이어스의 절반으로 하였다. RF 진폭이 커지면 효율이 좋아지고 출력이 증대되는 반면에 지나친 RF 진폭은 RF 값이 최소일 때의 전계를 지나치게 낮추게 되어 소자 설계에 있어 문제를 야

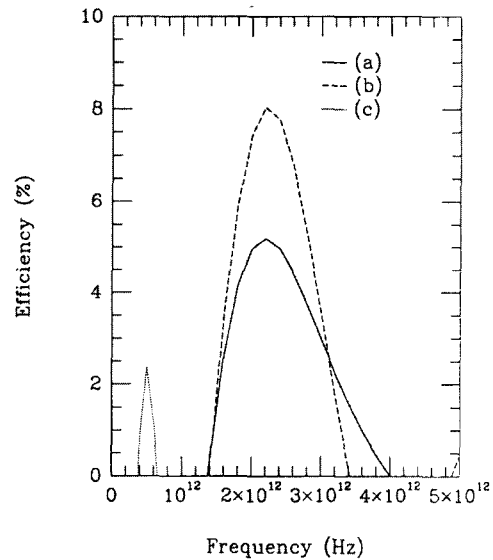


그림 3. $W=1500\text{\AA}$ 일 때 속도 오버슈트와 캐리어 확산 효과를 보여주는 주파수에 대한 변환 효율. (a)는 속도 오버슈트와 캐리어 확산을 고려한 경우이고, (b)는 속도 오버슈트는 고려하고 캐리어 확산을 무시한 경우이고, (c)는 속도 오버슈트와 캐리어 확산을 무시한 경우이다.

Fig. 3. The conversion efficiency versus frequency showing velocity overshoot and diffusion effects with $W = 1500 \text{ \AA}$. Curve (a) is calculated by including velocity overshoot and diffusion effects. Curve (b) is calculated by neglecting diffusion effects. Curve (c) is calculated with constant velocity and without carrier diffusion.

기한다. 드리프트 영역의 폭은 1500 Å으로 하였다. 그림 3과 그림 4에서 볼 수 있듯이 속도 오버슈트는 효율, 출력, 대역폭 등의 소자 성능을 개선하여 THz 주파수대에서 동작이 가능하게 한다. 예견되어지는 대로 캐리어 확산은 소자 성능을 저하시킨다.

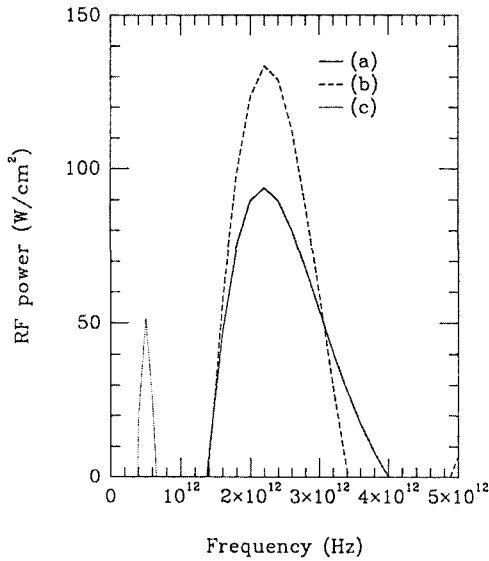


그림 4. 그림 3의 경우에 대응하는 주파수에 대한 출력 전력
 Fig. 4. The output power versus frequency corresponding to Fig. 3.

그림 5는 속도 오버슈트와 캐리어 확산 효과를 고려한 경우 드리프트 영역 폭 변화에 따른 변환효율을 주파수의 함수로 나타내었다. 그림 6은 이 경우의 RF 출력을 보여준다. 그림 5와 그림 6에서 볼 수 있듯이 다른 주행시간 소자와 마찬가지로 특정 주파수에 대해 효율 또는 출력을 극대화하는 드리프트 영역의 길이가 존재한다. 예를 들어 $W = 1500 \text{ \AA}$ 이고 $b = 1370 \text{ \AA}$, $N_2 = 7.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 일 때 2.2 THz에서 5.2 %의 최고 효율과 94 W/cm^2 의 최대 출력을 갖는다. 그림 7은 이 경우에 있어 인젝터 전압, 주입 전류밀도 (injection current density), 유도 전류밀도 (induced current density), 전체 전압을 보여준다.

변환효율과 출력을 고려해 볼 때 1500 Å이 드리프트 영역의 폭으로 적절하다고 판단된다. 드리프트 영역을 줄이면 대역폭이 넓어지고 동작주파수가 높아지는 것처럼 보인다. 그러나 본 시뮬레이션에서 모든 기생

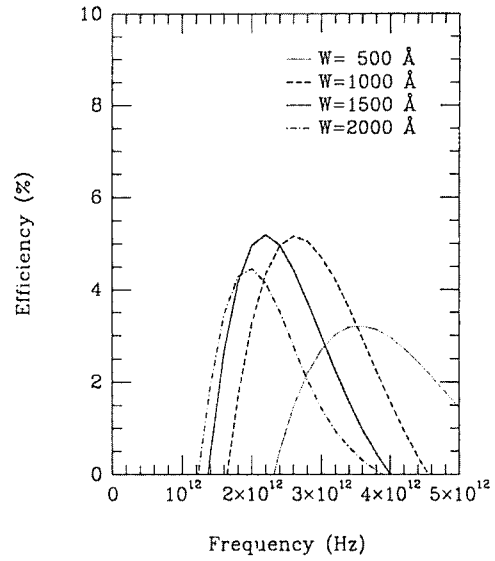


그림 5. 속도 오버슈트와 캐리어 확산 효과를 고려한 경우 드리프트 영역 폭 변화에 따른 주파수에 대한 변환 효율
 Fig. 5. The conversion efficiency versus frequency showing dependence upon drift region length including velocity overshoot and diffusion effects.

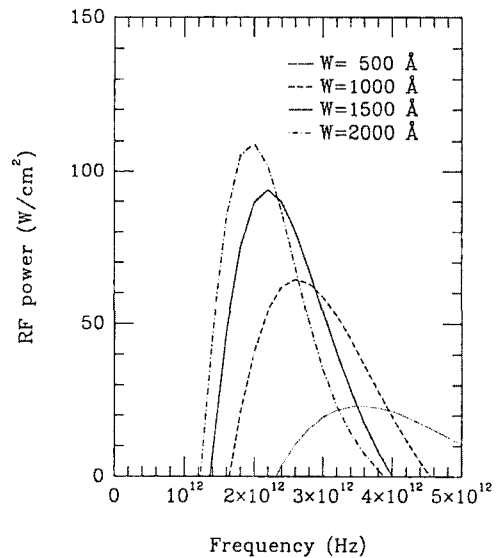


그림 6. 그림 5의 경우에 대응하는 주파수에 대한 출력 전력
 Fig. 6. The output power versus frequency corresponding to Fig. 5.

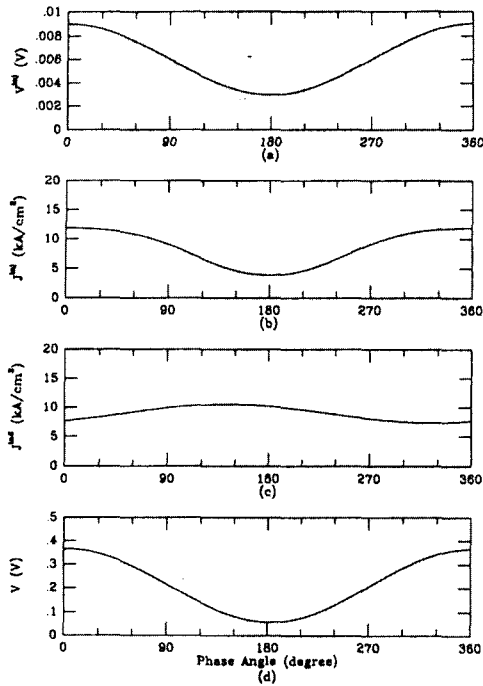


그림 7. 속도 오버슈트와 캐리어 확산 효과를 고려한 경우 드리프트 영역 폭이 1500 Å일 때 2.2 THz에서의 전압과 전류밀도 파형. (a)는 인젝터 전압, (b)는 주입 전류밀도, (c)는 유도 전류밀도, (d)는 전체 전압이다.

Fig. 7. The voltage and current density waveforms at 2.2 THz with a drift region length of 1500 Å including velocity overshoot and diffusion effects. (a) The voltage across the injector, (b) the injection current density, (c) the induced current density, and (d) the total voltage.

효과를 포함하지는 않았기 때문에 이러한 것들을 고려하게 되면 짧은 드리프트 영역의 경우 부저항 (negative resistance) 값이 매우 작아 소자가 제대로 동작하지 않을 수도 있다.

본 설계는 GaAs에 대한 Monte Carlo 시뮬레이션 데이터에 바탕을 두고 있지만 설계에 대한 개념은 과도 현상에 대한 기술이 가능한 다른 물질계에도 적용될 수 있다. 이와 같은 방법에 따라 설계된 소자는 다음 단계에서 제조되어지고 측정을 거쳐 설계 기법이 검증되어야 하므로 그 제조 및 측정에 대한 연구가 수행되어야 한다. 포물선 모양의 에너지 밴드 구조 제작이 보고되어 있으므로,^[15] 인젝터 영역의 에너지 밴드 선형 경사 뿐 아니라 드리프트 영역에 포물선 모양

의 에너지 밴드 경사를 구현하는 것은 가능하리라 보인다. 서브밀리미터파 소스의 경우 그 측정에 있어 quasi-optical 기술이 요구되어질 수 있다.

V. 결 론

드리프트 영역에서의 속도 오버슈트 효과를 이용하여 서브밀리미터파 주파수 영역에서 동작하는 새로운 주행 시간 소자를 제안한다. 이 소자를 속도 오버슈트 주행 시간 (VOTT) 다이오드라 명명한다. 이 소자는 캐리어 주입 메커니즘으로 빠르게 이루어지는 이중구조 터널링을 이용하며, 속도 오버슈트 효과를 최적화하기 위하여 짧은 드리프트 영역을 갖는다. 변환효율을 증대시키기 위하여 에너지 대역 간극을 경사시키는 방법으로 드리프트 영역을 설계한다. 시뮬레이션 결과에 따르면 이 소자는 THz 영역에서 동작하리라 기대된다. 이 소자는 부저항 특성을 이용하는 소자의 경우 발생할 수 있는 불안정성의 문제없이 연속적으로 집적이 가능하여 출력을 증대시킬 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed. New York: Wiley, 1981.
- [2] M. E. Elta and G. I. Haddad, "High-frequency limitations of IMPATT, MITTAT, and TUNNETT mode devices," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., vol. MTT-27, pp. 442~449, May 1979.
- [3] D. H. Chow and T. C. McGill, "Observation of negative differential resistance from a single barrier heterostructure," Appl. Phys. Lett., Vol. 52, pp. 54~56, Jan. 1988.
- [4] R. Beresford, L. F. Luo, and W. I. Wang, "Resonant tunneling through X-valley states in GaAs/AlAs/GaAs single barrier heterostructures," Appl. Phys. Lett., Vol. 55, pp. 1555~1557, Oct. 1989.
- [5] M. Reddy, S. C. Martin, A. C. Molnar, R. E. Muller, R. P. Smith, P. H. Siegel, M. J. Mondry, M. J. W. Rodwell, H. Kroemer, and S.

- J. Allen, Jr., "Monolithic Schottky-collector resonant tunnel diode oscillator arrays to 650 GHz," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 18, pp. 218~221, May 1997.
- [6] T. C. L. G. Sollner, W. D. Goodhue, P. E. Tannenwald, C. D. Parker, and D. D. Peck, "Resonant tunneling through quantum wells at frequencies up to 2.5 THz," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 43, pp. 588~590, Sep. 1983.
- [7] V. P. Kesan, D. P. Neikirk, B. G. Streetman, and P. A. Blakey, "A new transit-time device using quantum-well injection," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. EDL-8, pp. 129~131, Apr. 1987.
- [8] I. Song and D. S. Pan, "Analysis and simulation of the quantum well injection transit time diode," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-35, pp. 2315~2322, Dec. 1988.
- [9] P. A. Blakey, J. R. East, M. E. Elta, and G. I. Haddad, "Implications of velocity overshoot in heterojunction transit-time diodes," *Electron. Lett.*, Vol. 19, pp. 510~512, Jul. 1983.
- [10] T. H. Glisson, C. K. Williams, J. R. Hauser, and M. A. Littlejohn, "Transient response of electron transport in GaAs using the Monte Carlo method", in *VLSI Electronics: Microstructure Science*, Vol. 4, N. G. Einspruch, Ed. New York: Academic, 1982, pp. 99~145.
- [11] J. Y. Tang and K. Hess, "Investigation of transient electronic transport in GaAs following high energy injection," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-29, pp. 1906~1911, Dec. 1982.
- [12] I. Song, "A proposed efficiency enhancement design for the quantum well injection transit time diode," *KITE Journal of Electronics Engineering*, Vol. 5, No. 2, pp. 19~24, Dec. 1994.
- [13] S. Wang, *Fundamentals of Semiconductor Theory and Device Physics*, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.
- [14] I. Song and D. S. Pan, "A generalized analytical model for the quantum well injection transit time diode," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-38, pp. 14~22, Jan. 1991.
- [15] F. Capasso, S. Sen, A. C. Gossard, R. A. Spah, A. L. Hutchinson, and S. N. G. Chu, "Observation of resonant tunneling through a compositionally graded parabolic quantum well," in *IEDM Tech. dig.*, pp. 66~69, Dec. 1987.

 저 자 소 개



宋仁彩(正會員)

1981년 서울대학교 전자공학과 공학사. 1984년 University of California, Los Angeles, Electrical Engineering 공학석사. 1991년 University of California, Los Angeles, Electrical Engineering 공학박사. 1985년~1992년 Hughes Aircraft Company, Staff Engineer. 1992년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수.