

論文96-33A-10-17

빛에 의한 공명투과다이오드 진동자의 주파수 변조 특성

(Optical Modulation Characteristics of Resonant Tunneling Diode Oscillator)

秋 惠 容 *, 李 一 恒 *

(H. Y. Chu and E.-H. Lee)

요 약

이중장벽양자우물구조의 공명투과다이오드 진동자의 표면에 Ti:Sapphire 레이저를 조사하여 빛에 의한 주파수 변조를 성공적으로 유도하였으며, 이와 관련된 빛의 파장 및 세기에 의한 정특성 및 동특성의 변화를 조사하였다. 공명투과다이오드 진동자에 빛이 조사되면 dc 전류 - 전압 곡선이 낮은 전압 쪽으로 이동한다. 이러한 변화에 의하여 유도되는 직렬저항, 부저항, 정전용량, 그리고 인덕턴스의 증감이 공명투과다이오드 진동자의 주파수 특성을 변화시키게 된다. 빛 조사 이전의 공명투과다이오드 진동자는 5.302 GHz의 주파수 특성을 보였으나 740 nm 파장과 100 mW 세기를 갖는 빛을 조사하여 약 20 MHz의 주파수 감소가 관찰되었다. 이와 같은 주파수의 변화는 조사한 빛의 세기가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였다.

Abstract

We report on the static and dynamic characteristics of optically modulated resonant tunneling diode oscillator (RTDO) formed in double-barrier quantum-well structure. Under the illumination of Ti:Sapphire laser, the dc current-voltage (I-V) curves of RTDO shifted toward lower voltages. This characteristic was found to modify the series resistance, negative differential resistance, capacitance, and the inductance of the RTDO. As a result, the resonant frequency of RTDO centered at 5.302 GHz was found to decrease about 20 MHz under the laser illumination. At a constant bias voltage, the oscillation frequency decreased linearly as the laser power was increased.

I. 서 론

R. Tsu와 L. Esaki에 의해 이중장벽양자우물구조에서 공명투과 현상이 처음으로 관찰된^[1] 이후로 공명투과의 빠른 수송 속도와 부저항(negative differential resistance) 특성으로 인하여 폭넓은 응용가능성의 제시와 이를 검증하기 위한 연구가 다각적으로 수행되어 왔다. 특히, 공명투과현상을 이용한 진동소자로는 700 GHz 대 이상의 주파수 특성이 Brown

연구팀에 의하여 보고되었다.^[2] 그 외에 HEMT나 MESFET과 같은 기존의 트랜지스터와의 집적을 통하여 초고속 다중논리소자^[3], 메모리 소자^[4] 및 인공지능^[5]에의 응용 등 공명투과소자의 실용화를 위하여 꾸준한 노력들이 이루어지고 있다. 공명투과의 전기적 인 성질을 이용한 소자의 개발을 위한 연구와 더불어 최근 들어 일부 연구팀에서는 이중장벽양자우물구조와 같은 간단한 구조에서 공명투과의 전기적 특성과 광학적 특성의 접목을 통하여 초고속, 초고속 광전소자의 개발이 새로운 연구 방향으로 제시되었다. 이러한 연구의 일환으로 이중장벽양자우물구조에서 띠틈간의 전이를 이용한 광 변조기와 우물내의 띠틈간의 전이를 이용한 적외선 변조기 및 적외선 검출기에 대한 이론적 분석^[6,7]이 이루어졌으며, 이중장벽양자우물구조에서 이중

* 正會員, 韓國電子通信研究所 基礎技術研究部

(Electronics and Telecommunications Research Institute, Research Department)

接受日字: 1996年6月24日, 수정완료일: 1996年9月13日

접합의 경계면과 양자우물내의 공간전하의 축적이 공명투과 광소자의 특성에 미치는 영향의 분석 및 최적 조건 도출을 위한 연구가 수행되었다.^[8-10] 공명투과 다이오드에 빛을 조사하여 전기적 특성의 변화를 관찰한 연구로는 England 팀^[11]에서 공명투과다이오드에 레이저를 조사하여 공명투과의 조건을 제어함으로써 광 교환의 특성을 보고한 바 있다. 또한, Lann 팀^[12]에서는 공명투과다이오드 진동자(Resonant Tunneling Diode Oscillator ; RTDO)에 진동자의 주파수와 유사한 주파수의 빛을 조사하여 위상 잠금 현상을 관찰한 결과를 발표한 바 있다. 그러나 공명투과다이오드 진동자의 진동 주파수를 레이저로 직접 변조시키려는 노력은 없었다.

본 연구에서는 AlAs/GaAs/AlAs 구조의 RTDO를 제작하여 레이저의 조사에 따른 dc 전류-전압 특성 및 진동 주파수의 변화를 측정·분석함으로써 빛에 의한 공명투과소자의 고주파 진동 특성이 제어 가능함을 제시한다.

II. 실험방법

본 실험에 사용한 공명투과다이오드의 수직구조는 반절연성 (100) GaAs 기판위에 분자선기상성장법으로 성장시켰다. 기판위에 1000 nm의 n^+ 형 GaAs ($N_d = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)의 완충층을 성장시킨 후, 성장동안에 Si이 양자장벽과 우물로 확산되는 것을 막기 위하여 n 형 GaAs($N_d = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)와 도우핑 안된 GaAs 층을 각각 50 nm와 10 nm의 두께로 성장시키는 2 단계로 간격층을 성장시켰다. 양자우물은 도우핑 안된 GaAs를 4.5 nm 두께로 성장시키고, 우물의 양쪽에 양자장벽으로 도우핑 안된 AlAs를 2.8 nm의 두께로 대칭하여 성장시킨 후, 그 위에 다시 2 단계 간격층을 대칭하여 성장시켰다. 오음 접촉의 형성을 위하여 간격층 위에 n^+ 형 GaAs ($N_d = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)를 500 nm의 두께로 성장시켰다. 이상과 같은 수직구조의 시편을 이용하여 면적이 $7 \times 7 \mu\text{m}^2$ 인 메사 다이오드를 광학 리소그라피와 습식 식각방법으로 제작한 후, $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ 면적의 AuGe/Ni/Au 금속을 연속 증착하여 리프트-오프 방법으로 패터를 형성하고 고속 열처리 방법으로 오음 접촉을 제작하였다. 그 위에 절연막을 증착하여 오음 접촉과 본딩 패드를 연결해 줄 수 있는 접촉홀을 형성한 후 Ti/Au 금속으로 본딩 패드를 형

성하였다. 이상의 공정 과정을 통하여 제작된 RTDO의 단면은 그림 1과 같다. RTDO의 진동 특성을 측정하기 위하여 50 Ω 마이크로 스트립 라인에 은에폭시로 부착시킨 후 직경 20 μm 의 금선으로 3회의 와이어 본딩을 수행하여 인덕턴스를 최소화하였다. RTDO의 dc 전류-전압 특성은 HP 4145B 반도체 특성 분석기로 측정하였으며, 주파수 특성은 바이어스 티를 통하여 Kethley 236 Source/Measure Unit로 dc 바이어스를 인가하며 Tek 2756P Spectrum Analyzer로 주파수 스펙트럼을 측정하였다. 실험에 사용한 광원은 15W Ar⁺ 레이저로 펄핑된 tunable cw Ti:Sapphire 레이저로 오음 접촉이 형성되지 않은 메사의 표면에 빛을 입사시켰다. 이때 입사 광의 직경은 약 100 μm 으로 메사뿐만 아니라 메사 주위의 GaAs 완충층이 조사된다. 모든 실험은 실온에서 수행되었다.

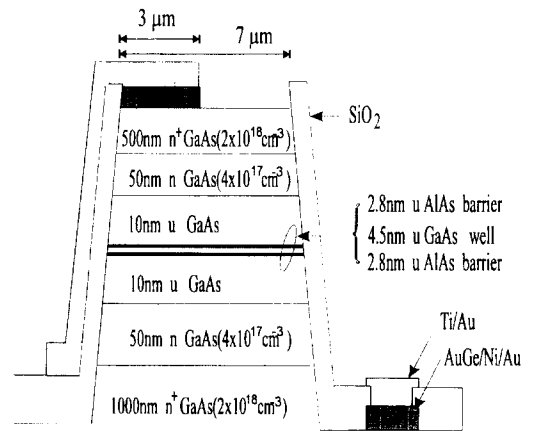


그림 1. 공명투과다이오드 진동자의 단면도
Fig. 1. Cross section of RTDO.

III. 결과 및 고찰

그림 2는 파장이 740 nm이고 세기가 100 mW인 빛을 RTDO의 표면에 조사했을 때 dc 전류-전압 특성의 변화를 보여 준다. 실선은 빛 조사 이전이고 점선은 빛 조사 이후의 특성을 나타내는 것으로 빛 조사에 의하여 피크전압이 감소하고 피크전류가 증가한 것을 알 수 있다. 이는 빛의 조사에 의하여 접촉층 및 간격층에 생성된 수송자에 의하여 전기전도도가 증가하므로 직렬저항이 감소하게 된다. 또한 이때 생성된 전자 및 양공이 각각의 축적층에 축적됨으로써 이중장벽양자우물구조에서의 정전기 퍼텐셜을 변화시킨다. 이와같

은 효과에 의하여 빛 조사 이전보다 낮은 전압에서 동일한 투과 확률을 주는 전기장이 이중장벽양자우물구조에 형성된다. 따라서 RTDO의 dc 전류-전압 특성에서 피크가 낮은 전압으로 이동하게 된다.^[13,14] 또한 피크전류에 비하여 밸리전류의 증가가 크게 나타나는데, 이는 본 실험이 열싱크 없이 실온에서 이루어졌으므로 레이저 조사로 여기된 수송자들에 의한 열방출 전류의 증가로 인하여 비공명투과 전류가 증가하기 때문이다.

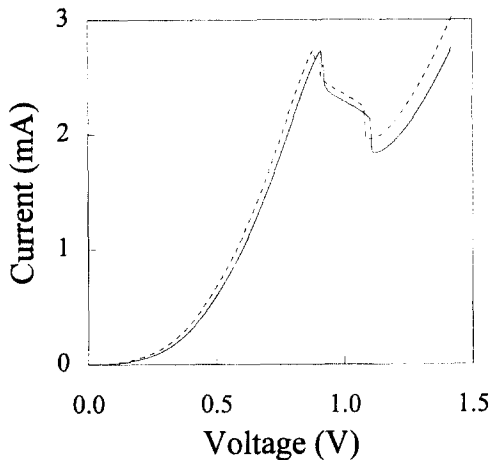


그림 2. 공명투과다이오드 진동자의 빛 조사에 따른 dc 전류-전압 특성
Fig. 2. Dc current-voltage characteristics of RTDO under laser illumination.

그림 2와 같은 dc 전류-전압 특성을 갖는 RTDO의 부저항 영역에 적절한 바이어스 전압을 인가하면 RTDO는 고주파의 자기 진동 특성을 보이게 된다. RTDO의 진동 특성은 식 (1)과 같이 단순화시켜 나타낼 수 있는데, 이때 RTDO의 컷오프 주파수(f_c)와 자기 공명 주파수(f_r)는 각각 식(2)와 (3)과 같이 나타내어진다.^[15]

$$Z_{input} = R_s + j\omega L_s + \frac{R_n[j\omega C]}{-R_n - j\omega C}$$

$$= R_s - \frac{R_n}{1 + (\omega R_n C)^2} + j[\omega L_s - \frac{\omega R_n^2 C}{1 + (\omega R_n C)^2}] \quad (1)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_n C} \sqrt{\frac{R_n}{R_s} - 1} \quad (2)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi R_n C} \sqrt{\frac{R_n C}{L_s} - 1} \quad (3)$$

여기서 Z_{input} 는 입력 임피던스, R_n 은 RTDO의 부저항, R_s 는 직렬저항으로 에피구조와 오음접촉 그리고 회로상에서 발생될 수 있는 모든 직렬저항을 나타내며 C 는 이중장벽양자우물구조 및 본드패드 형성과정에서 발생하는 정전용량을 나타낸다. L_s 는 패키징된 회로의 인덕턴스를 나타낸다. 즉, RTDO의 진동 주파수가 직렬저항, 부저항, 정전용량 및 인덕턴스에 의하여 결정지어짐을 알 수 있다. 그림 3은 빛 조사 이전에 RTDO의 동특성으로 왼쪽과 오른쪽 스펙트럼은 각각 0.973 V와 1.093 V의 전압을 인가했을 때의 주파수 특성을 나타낸다. 인가 전압에 따라 5.280 GHz에서 5.316 GHz로 36 MHz의 주파수 변화를 관찰할 수 있었다. 이는 각 인가전압에서의 직렬 및 부저항과 정전용량, 그리고 인덕턴스가 다르기 때문임을 알 수 있다. 이러한 특성을 갖는 RTDO에 빛이 조사되면 그림 2와 같은 전류-전압 특성의 변화로 인하여 주파수 특성이 변조될 수 있음을 예측할 수 있다.

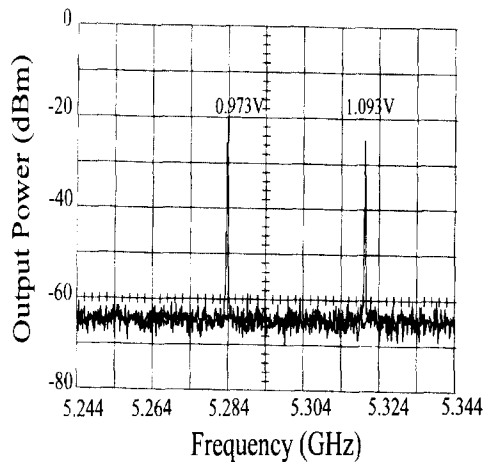


그림 3. 공명투과다이오드 진동자의 진동 주파수
Fig. 3. Oscillation frequency of RTDO.

그림 4는 5.302 GHz의 주파수 특성을 갖는 RTDO의 표면에 파장이 740 nm이고 세기가 100 mW인 빛을 조사했을 때의 주파수 스펙트럼으로 오른쪽은 빛 조사 이전이고 왼쪽은 빛 조사 이후의 특성이다. 빛 조사에 의하여 5.2816 GHz로 약 20 MHz 주파수 감소가 관찰되었다. 그림 2에서 고찰한 것처럼 740 nm (= 1.676 eV) 파장의 레이저가 조사되면 여기된 수송자들에 의한 열방출 전류가 증가하게 되고 온도 상승 효과 등으로 인하여 비공명 투과전류가 증가하게 된다. 따라

서 피크전류보다 밸리전류가 더 크게 증가하게 되는데 이와같은 변화는 부저항 영역을 감소시킨다. 참고문헌 14에 따르면 저온을 유지하며 빛을 조사한 경우에는 밸리전류가 변화가 없음을 알 수 있었다. 따라서 실온에서 빛 조사에 의한 RTDO의 주파수 감소는 비공명투과전류의 증가에 의하여 야기되는 수송자의 축적 감소와 부저항의 증가 그리고 부저항 영역의 감소에 의한 인덕턴스의 변화등에 의한 것으로 분석된다.

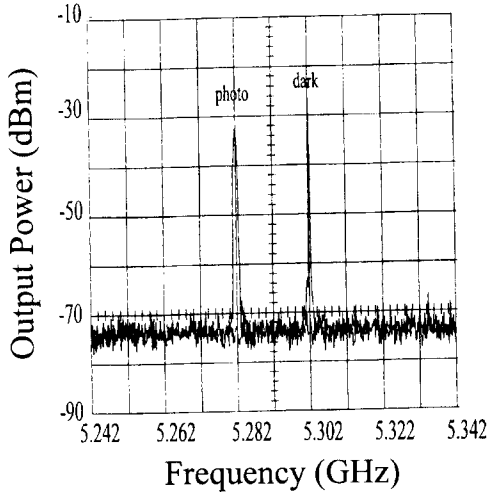


그림 4. 공명투과다이오드 진동자의 빛 조사에 의한 주파수 특성

Fig. 4. Oscillation frequency of RTDO under laser illumination.

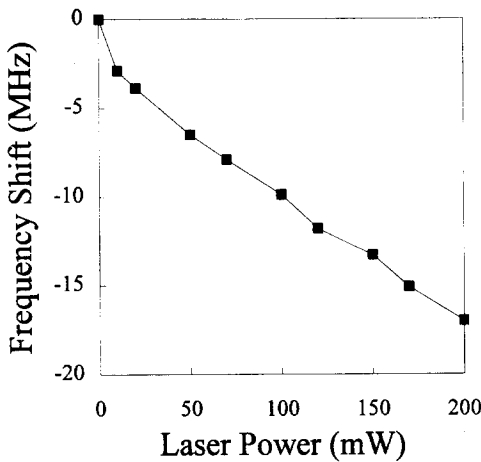


그림 5. 공명투과다이오드 진동자의 빛 세기에 따른 주파수 변화

Fig. 5. Frequency shifts of RTDO vs. optical power of laser.

앞서 언급한 요인들이 RTDO의 특성에 미치는 영향을 정량적으로 설명하기는 어려운 일이다. 그러나 각 요인들의 복합적인 효과에 의하여 접촉층 및 간격층에서 전자-정공의 생성이 포화가 되기 이전의 빛의 세기에서 RTDO의 주파수 특성이 빛의 세기에 따라 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 그림 5는 입사 빛의 파장이 830 nm일 때 빛의 세기에 따른 RTDO의 진동 주파수의 변화를 나타내는 것으로 세기가 증가함에 따라 진동 주파수가 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 기존의 고주파 진동소자의 ON 혹은 OFF 스위칭 방식과는 달리 RTDO를 이용하여 입사 빛의 세기와 인가전압에 따라 RTDO의 고주파 진동특성을 다단계로 조절할 수 있음을 보여준다.

IV. 결 론

AlAs/GaAs/AlAs 이중장벽양자우물구조의 RTDO를 제작하여 Ti:Sapphire 레이저의 조사에 따른 정특성 및 동특성의 변화를 조사하였다. RTDO에 빛이 조사되면 dc 전류-전압 곡선이 낮은 전압 쪽으로 이동한다. 이러한 특성을 갖는 RTDO의 표면에 740 nm 파장과 100 mW 세기를 갖는 빛을 조사하였을 때 약 20 MHz의 주파수 감소가 관찰되었다. 이와같은 변화는 조사한 빛의 세기가 증가함에 따라 선형적으로 감소하였다. 뿐만아니라 RTDO의 부저항 영역에 해당되는 인가전압에 따라 5.280 GHz에서 5.316 GHz로 36 MHz의 주파수 변화를 관찰할 수 있었다. 이러한 결과는 기존의 고주파 진동소자의 ON 혹은 OFF 스위칭 방식과는 달리 입사 빛의 세기와 인가전압에 따라 RTDO의 고주파 진동특성을 다단계로 제어할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

※ 본 연구는 정보통신부의 출연금에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] R. Tsu and L. Esaki, "Tunneling in a finite superlattice", Appl. Phys. Lett. vol. 22, no. 11, pp. 562-564. 1973.

- [2] E. R. Brown, J. R. Soderstrom, C. D. Parker, L. J. Mahoney, K. M. Molvar, T. C. McGill, "Oscillations up to 712 GHz in InAs/AlSb resonant-tunneling diodes", Appl. Phys. Lett. vol 58, no. 20, pp. 2291-2293, 1991.
- [3] Y. Watanabe, Y. Nakasha, K. Imanishi, and M. Takikawa, "Monolithic intergration of InGaAs/InAlAs resonant tunneling diode and HEMT for single-transistor cell SRAM application", Proceedings of International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, pp. 475-478, 1992.
- [4] K. K. Gullapalli, A. J. Tsao, and D. P. Neikirk, "Observation of zero-bias multi-state behavior in selectively doped two-terminal quantum tunneling devices", *ibid*, pp. 479-482, 1992.
- [5] Harold J. Levy and T. C. McGill, "A feedforward artificial neural network based on quantum effect vector-matrix multipliers", IEEE Trans. Neural Network vol. 4, no. 3, pp. 427-433, 1993.
- [6] I. Mehdi, G. I. Haddad, and R. K. Mains, "Novel use of resonant tunneling structures for optical and IR modulators", Superlattices and Microstructure vol. 5, no. 3, pp. 443-449, 1989.
- [7] W. Cai, T. F. Zheng, P. Hu, M. Lax, K. Shum, and R. R. Alfano, "Photo-assisted resonant tunneling through a double-barrier structure for infrared-radiation detection", Phy. Rev. Lett. vol. 65, no. 1, pp. 104-107, 1990.
- [8] S. C. Kan, S. Wu, S. Sanders, G. Griffel, and A. Yariv, "Optically controlled resonant tunneling in a double-barrier diode", J. Appl. Phys. vol. 69, no. 5, pp. 3384-3386, March 1991.
- [9] H. C. Liu, A. G. Steele, M. Buchanan, and Z. R. Qasilewski, "Long-wavelength infrared photoinduced switching of a resonant tunneling diode using the intersubband transition", IEEE. Electron Device Lett. vol. 13, no. 7, pp. 363-365, July 1992.
- [10] H. Schneider, E. C. Larkins, J. D. Ralston, K. Schwartz, F. Fuchs, and P. Koidl, "Space-charge effects in photovoltaic double barrier quantum well infrared detectors", Appl. Phys. Lett. vol. 63, no. 6, pp. 782-784, 1993.
- [11] P. England, J. E. Golub, L. T. Florez, and J. P. Harbison, "Optical switching in a resonant tunneling structure", Appl. Phys. Lett. vol. 58, no. 9, pp. 887-889, 1991.
- [12] A. F. Lann, E. Grumann, A. Gabai, J. E. Golub, and P. England, "Phase locking between light pulses and a resonant tunneling diode oscillator", Appl. Phys. Lett. vol. 62, no. 1, pp. 13-15, 1993.
- [13] 추혜용, 박병운, 김경옥, 최영완, 한선규, "빛 조사에 따른 공명투과다이오드의 전류-전압 특성 연구", 응용물리 vol. 7, no. 2, pp. 138-142, 1994
- [14] 추혜용, 박병운, 한선규, 이일항, "이중장벽양자우물구조에서 광생성된 양공에 의한 공명투과현상 연구", 새물리 vol. 35, no. 3, pp. 348-352, 1995
- [15] 天野橋太郎, エサキタ"イオート" その特性と使い方, 國際電信電話(株) 研究所, p.593, 1965.

 저 자 소 개

秋 惠 容(正會員)

1964년 8월 3일생. 1987년 2월 경희대학교 물리학과 졸업(이학사). 1989년 8월 경희대학교 대학원 졸업(이학석사). 1989년 8월 ~ 현재 한국전자통신연구소 기초기술연구부 선임연구원 주관심분야는 양자관통소자의 설계 제작 및 특성연구와 반도체 레이저의 제작 및 특성 연구임

李 一 恒(正會員)

1988년 ~ 현재 전자통신연구소 책임연구원 기초기술 연구부장