

論文94-31A-2-10

# 공명투과다이오드를 이용한 논리회로의 응용 연구

## (Study for Digital Logic Circuit Using Resonant Tunneling Diodes)

秋惠容\*, 朴炳雲\*, 李昌喜\*\*, 李一恒\*

(Hye Yong Chu, Pyong Woon Park, Chang Hee Lee and El Hang Lee)

### 要約

AlAs/GaAs/AlAs 구조의 공명투과다이오드(Resonant Tunneling Diodes)를 제작하여 전류-전압 특성을 측정하였다. 실온에서 피크 대 밸리전류의 비가 2.4였으며, 이와같은 공명투과다이오드의 쌍안정 특성을 이용하여 NOT, AND, OR 논리게이트 및 Flip-Flop을 제작하였다. 이는 트랜지스터를 이용하여 NOT, AND, OR 논리게이트를 만들 경우에는 5 ~ 8개의 트랜지스터가 사용되는데 반하여 한 개의 공명투과다이오드로 제작이 가능함을 보여준다. 또한 스위칭 시간이  $< 10^{12}$ sec로 빠른 동작 특성을 가지므로 공명투과다이오드를 이용할 경우 반도체 회로의 고속화 뿐만아니라 고집적화도 가능하게 한다. 또한 두개의 공명투과다이오드를 직렬로 연결하여 전류량이 비슷한 두개의 피크를 얻어냄으로써 다중논리회로 등의 응용 가능성을 확인하였다.

### Abstract

AlAs/GaAs/AlAs RTDs(Resonant Tunneling Diodes) are fabricated and current-voltage properties of them are measured. At room temperature, peak to valley ratio is 2.4. NOT, AND, OR logic gates and Flip-Flop are fabricated using the bistable characteristics of RTDs. Although NOT, AND, OR logic gates need 5 ~ 8 transistors, only one RTD is sufficient to fabricate the logic gates. Since the switching time is very short ( $< 10^{12}$ sec), it is possible to drive the semiconductor circuits fast and integrate them very large. And it is convinced the possibility of integrating RTDs to multilevel logic circuits by observing two peaks of similar current in the serial connection of two RTDs.

### 1. 서론

\* 正會員 韓國電子通信研究所 基礎技術研究室  
(Electronics and Telecommunications Research  
Institute, Basic Research Department)

\*\* 正會員 韓國電子通信研究所 光通信研究部  
(Electronics and Telecommunications Research  
Institute, Optical Communication Section)

接受日字 : 1992年 9月 25日

기존의 반도체 기술은 리소그래피(lithography) 기술의 발달로 소자의 크기를 줄여 고집적화를 이루어왔다. 그러나 선폭이 전자의 mean free path 이하로 줄어들 경우에는 시스템 전체가 양자역학적인 영역에 들어가게 되어 기존의 소자나 회로 이론으로는 설명할 수 없는 양자현상들이 나타나게 된다. 따

라서 궁극적인 목표인 고집적화를 이루기 위해서는 기존의 반도체 기술의 집적화에 장애요인이 되는 양자효과를 보다 능동적으로 이용하는 새로운 개념의 소자와 회로의 개발이 요구되어지게 된다. 1974년에 L.L. Chang, L. Esaki와 R. Tsu<sup>1</sup>가 GaAs/AlGaAs의 이중접합 이중장벽 양자우물구조에서 처음으로 공명투과에 의한 부저항 현상을 관찰한 이후에 이 현상에 대한 메커니즘 및 특성 향상을 위한 연구가 수행되었다. 특히 이러한 연구는 분자선기상성장법(MBE : Molecular Beam Epitaxy) 및 유기금속화학증착법(MOCVD : Metallorganic Chemical Vapor Deposition)등과 같은 에피성장기술의 발달과 더불어 꾸준히 그 특성이 향상되어 1983년에 T. C.L.G. Sollner<sup>2</sup> 등에 의해 처음으로 실온에서 부저항 특성을 관찰된 이래 최근에는 실온에서 피크 대밸리의 비가 30:1인 공명투과다이오드가 보고되었다.

<sup>3</sup> 이와 더불어 공명투과다이오드의  $<10^{-13}$ sec의 초고속의 공명투과속도와 쌍안정 특성을 이용한 스위칭 소자, 증폭소자, 기억소자, 발진소자, 및 고속 논리소자, 그리고 두개 이상의 공명투과다이오드를 집적하여 다중논리회로등에의 응용성에 대한 연구가 행하여지고 있으며, 최근에는 인공지능망에 공명투과다이오드를 응용하기 위한 연구가 수행되어지고 있다. 특히 발진소자의 경우는 AlAs/GaAs/AlAs 구조의 공명투과다이오드로 420GHz로 발진되는 것이 보고되었으며<sup>4</sup>, InSb/InAs/InSb 구조에서는 716GHz까지 보고된 바 있다.<sup>5</sup>

본 논문에서는 AlAs/GaAs/AlAs 구조의 공명투과다이오드를 제작하여 그 특성을 측정하였으며, 공명투과다이오드의 쌍안정 특성을 이용하여 NOT, AND, OR 논리 게이트와 Flip-Flop의 동작 원리 및 그 특성을 제작 분석하였다.

## II. 실험 방법

본 실험에 사용한 공명투과다이오드의 수직구조는 Si이  $10^{18}cm^{-3}$  이상 도우핑된 반전도성 기판에 완충층으로 Si을  $2 \times 10^{18}cm^{-3}$  도우핑하여 10,000Å 성장시킨 후, 양자우물은 GaAs를 45Å로 양자장벽은 AlAs를 이용하여 40Å의 폭으로 대칭하여 성장시켰다. 성장동안에 Si이 양자장벽으로 확산되는 것을 막아주기 위하여 양자장벽의 양쪽에 간격층(spacer layer)으로 도우핑이 안된 GaAs 100Å과 Si이  $4 \times 10^{17}cm^{-3}$  도우핑된 GaAs 3,000Å을 대칭하여 성장시켰다. 저항성 접촉을 위하여 간격층의 위에 Si이  $2 \times 10^{18}cm^{-3}$  도우핑된 GaAs를 5,000Å 성장시켰다.

위와 같은 구조의 시편은 프랑스 PICO GIGA사에서 분자선기상성장법(MBE)으로 성장시켰으며, TEM 관찰한 결과 이중장벽의 대칭성이 매우 좋음을 관찰하였다.

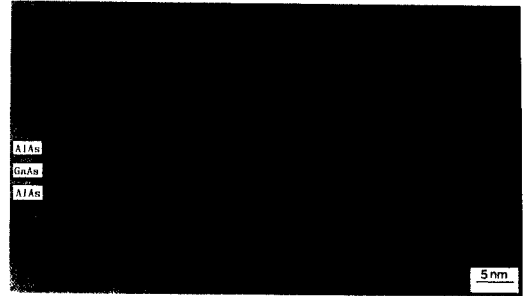


그림 1. AlAs/GaAs/AlAs 구조의 TEM 단면 사진  
Fig. 1. Cross-section TEM image of AlAs/GaAs/AlAs structure.

위의 시편을 이용한 공명투과다이오드의 제작 공정에는 각각의 다이오드를 고립시키기 위한 메사에칭, 저항성 접촉 형성, 절연막의 증착 후에 저항성 접촉용 금속과 wire bonding pad의 금속을 이어주는 접촉 홀 형성, 그리고 bonding 패드 형성을 위한 모두 4장의 마스크가 이용된다. 메사에칭은  $H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ 를 이용하였으며, 저항성 접촉은 AuGe/Ni/Au를 연속 증착하여 lift-off 방법으로 패턴을 형성한 후 RTA(Rapid Thermal Annealing) 방법으로 450°C에서 열처리하였다. 이상과 같이 제작한 공명투과다이오드의 단면은 그림 2와 같으며, 특성의 측정은 HP 4145B semiconductor parameter analyzer 및 HP 54503A digitizing oscilloscope를 이용하여 측정하였다.

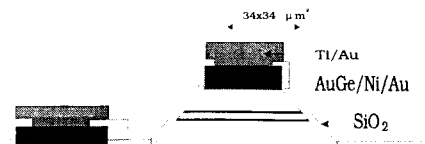


그림 2. 공명투과다이오드의 단면  
Fig. 2. Cross-section of resonant tunneling diode.

## III. 결과 및 논의

그림 3은: 제작된 공명투과다이오드의 실온에서의

전류-전압 특성이다. 이때 mesa면적이  $34 \times 34 \mu\text{m}^2$ 으로 피크전류는 0.8V에서 71.67mA이고 피크 대 밸리전류의 비는 2.4이다. 공명투과다이오드의 쌍안정 모드에서 동작하는 논리회로를 제작할 경우에 공명투과다이오드의 부저항을  $R_i$ 라 하고, 공명투과다이오드의 정전용량을  $C_d$ 라 할 때, 스위칭 시간( $t$ )은  $t = R_i C_d$ 와 같이 나타낼 수 있다. 즉 그림 3의 특성을 갖는 공명투과다이오드의 경우는 스위칭 시간이  $\sim 10^{-12}$ 초 정도로 초고속의 특성을 갖는다. 이와 같은 초고속 성질과 쌍안정 특성을 이용하여 고속의 논리 소자로 응용이 가능하다.

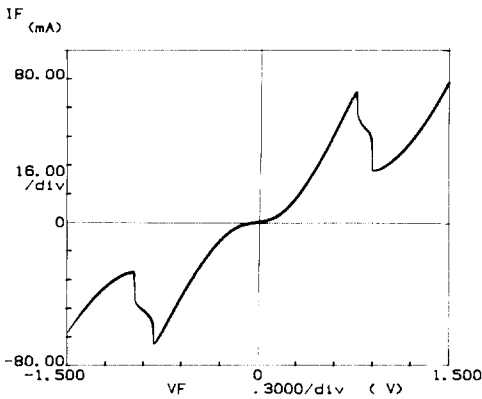


그림 3. 공명투과다이오드의 전류-전압 특성  
Fig. 3. Current-voltage characteristic of resonant tunneling diode.

그림 4(a)와 (b)는 그림 3의 특성을 갖는 공명투과다이오드를 이용한 NOT 논리게이트의 동작 회로도 및 특성이다. 그림 4(a)와 같이 공명투과다이오드가 쌍안정 모드에서 동작할 수 있도록 저항  $R_1$ 과 부하  $R_L$  및 전압  $E$ 를 결정한다. 공명투과다이오드가  $V_a$ 점의 저전압 상태에 있으면  $I_a$ 의 고전류가 흐르기 위해서는  $R_L$ 의 전압은 고전압 상태가 된다. 여기에 양의 입력신호가 가해지면 공명투과다이오드는  $V_b$ 점의 고전압 상태로 스위칭하여  $I_b$ 의 저전류가 흐르게 되므로  $R_L$ 의 양단에 걸리는 전압은 감소한다. 이와 반대로 음의 입력신호가 가해지면  $R_L$ 의 걸리는 전압은 증가하여 NOT 논리게이트로 동작하게 된다.

그림 5는 공명투과다이오드를 이용한 AND 및 OR 논리게이트의 동작 회로도(a) 및 이를 이용한 AND 논리 게이트의 특성(b)이다. 그 동작원리는 먼저 공명투과다이오드가 쌍안정 모드에서 동작할 수 있도록 그림 5(a)와 같이 전압  $E$ 와 저항  $R_1$ 을 결정

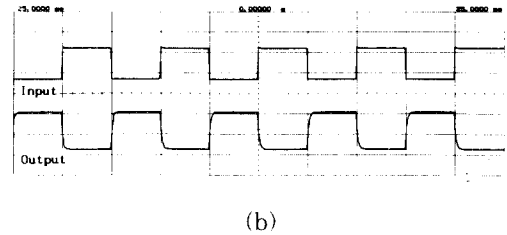
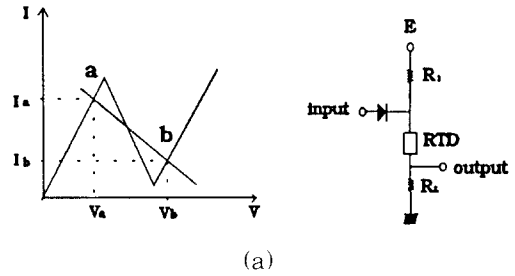
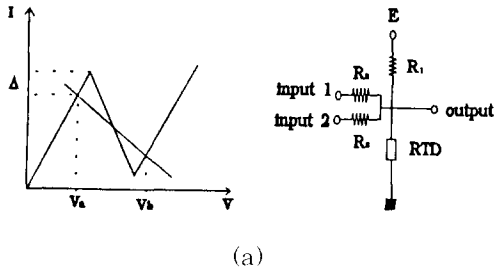


그림 4. 공명투과다이오드를 이용한 NOT 논리 게이트의 회로도(a) 및 특성(b) 이때  $E=1V$ ,  $R_1=20\Omega$ ,  $R_L=4\Omega$ , Input=2V임

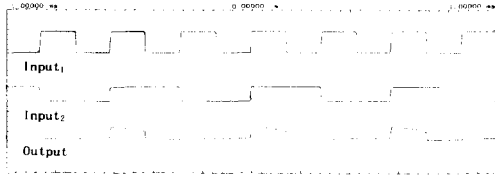
Fig. 4. Circuit diagram(a) of NOT logic gate using resonant tunneling diode and properties(b) of NOT logic gate. The parameters are  $E=1V$ ,  $R_1=20\Omega$ ,  $R_L=4\Omega$ , Input=2V.

해준다. 공명투과다이오드가 a의 저전압-고전류점에서 동작할때  $\Delta$ 보다 큰 입력신호가 들어오게 되면 b의 고전압-저전류점으로 스위칭한다. 즉,  $R_2$  혹은  $R_3$ 에 입력되는 신호가 ( $\Delta/2$ )보다 크고  $\Delta$ 보다 적을 경우에는  $R_2$ 와  $R_3$ 에 모두 신호가 입력될때만 스위칭하여 AND 논리게이트로 동작하게 되고 입력신호가  $\Delta$ 보다 클 경우는  $R_2$ 와  $R_3$ 중 어느 하나의 신호만 입력되어도 스위칭하여 OR 게이트로 동작하게 된다. 그림 5(b)는 그림 3의 전류-전압 특성을 갖는 공명투과다이오드를 이용한 AND 논리 게이트이다. 이는 트랜지스터를 이용하여 논리게이트를 제작할 경우 5 ~ 8개의 트랜지스터가 필요한 것에 비교해 볼 때 하나의 공명투과다이오드로 논리게이트를 만들 수 있으므로 회로의 단순화 및 고집적화를 이룰 수 있다.

그림 6은 공명투과다이오드 NOT 논리게이트를 이용한 Flip-Flop의 회로도(a)와 그 특성(b)이다. 공명투과다이오드중 하나는 a점에서, 다른 하나는 b점에서 동작하도록 전압  $E$ 와 저항  $R_L$ 를 결정하고, 저항  $R_1$ ,  $R_2$ 는 공명투과다이오드의 부저항보다 크게 해 준



(a)



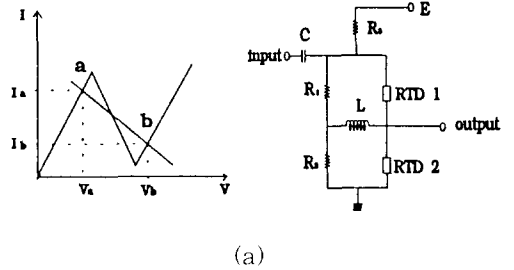
(b)

그림 5. 공명투과다이오드를 이용한 AND와 OR 논리게이트의 회로도(a) 및 AND 논리게이트의 특성(b). 이때  $E=1V$ ,  $R_1=4\Omega$ ,  $R_2=R_3=300\Omega$ ,  $Input_1=Input_2=5V$ 임

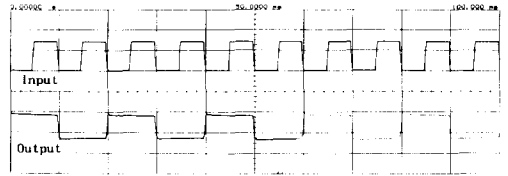
Fig. 5. Circuit diagram(a) of AND and OR logic gate using resonant tunneling diode and properties(b) of AND logic gate. The Parameters are  $E=1V$ ,  $R_1=4\Omega$ ,  $R_2=R_3=300\Omega$ ,  $Input_1=Input_2=5V$ .

다. 이때 두개의 공명투과다이오드를 흐르는 전류의 차가 인덕턴스 L에 흐르는데, 안정된 상태에서는 L의 양단에 전압이 발생하지 않는다. 여기에 양의 펄스를 입력하면 저전압-고전류(a점) 상태에 있는 공명투과다이오드가 고전압-저전류(b점) 상태로 스위칭하게 되는데, 이때 인덕턴스 L에 흐르는 전류가 변하기 때문에 여기에 전압이 발생하여 고전압-저전류 상태에 있던 공명투과다이오드를 저전압-고전류 상태로 스위칭하게 한다. 이어서 입력 펄스가 가해지면 NOT 회로에 전압이 반전하여 두개의 입력 펄스가 있을 때 다시 원래의 상태로 되돌아가는 flip-flop 회로가 된다. 그림 6(b)는 같은 원리로 RTD 1이 고전압-저전류(b점) 상태에 있고, RTD 2가 저전압-고전류(a점) 상태에 있을 때 음의 입력신호에 의하여 동작하는 Flip-Flop의 동작 특성이다.

그림 7은 비슷한 특성을 갖는 두개의 공명투과다이오드를 직렬로 연결하여 얻은 전류-전압 특성이다.



(a)



(b)

그림 6. 공명투과다이오드를 이용한 Flip-Flop의 회로도(a) 및 특성(b). 이때  $E=2V$ ,  $R_1=4\Omega$ ,  $R_1=R_2=100\Omega$ ,  $L=400mH$ ,  $Input=1.5V$ 임

Fig. 6. Circuit diagram and property of Flip-Flop using resonant tunneling diodes. The Parameters are  $E=2V$ ,  $R_1=4\Omega$ ,  $R_1=R_2=100\Omega$ ,  $L=400mH$ ,  $Input=1.5V$ .

두개의 공명투과다이오드를 직렬로 연결하면 두 다이오드에 일정한 전류가 흐르게 되므로 그림 7(a)에서 처럼 a-b-c-d-e의 순으로 각각의 공명투과다이오드가 동작하게 된다. 따라서 연결해준 공명투과다이오드 각각의 피크전류와 피크 대 밸리전류의 비의 특성을 갖는 두개의 피크를 관찰할 수 있게 된다. 이와 같이 두개의 피크를 얻는 방법에는 위의 직렬로 연결하는 방법 이외에 병렬로 연결하는 방법<sup>6</sup>과 두개의 이중장벽우물구조를 간격층을 사이에 두고 연속 성장시키는 방법<sup>7</sup>이 있다. 그러나 병렬 연결하는 방법은 두 공명투과다이오드간에 전압강하를 조절하기가 무척 어려우며, 연속성장 방법은 간격층의 도우핑 정도와 두께에 따라 크게 영향을 받는다. 반면에 직렬 연결로 두개의 피크를 구할 경우 연결해준 공명투과다이오드의 특성을 그대로 나타내므로 이미 특성을 알고 있는 공명투과다이오드를 이용하여 원하는 특성의 이중피크를 얻어낼 수 있다. 또한 N개의 공명투과다이오드를 직렬로 연결하면 N+1개의 안정된 상태를

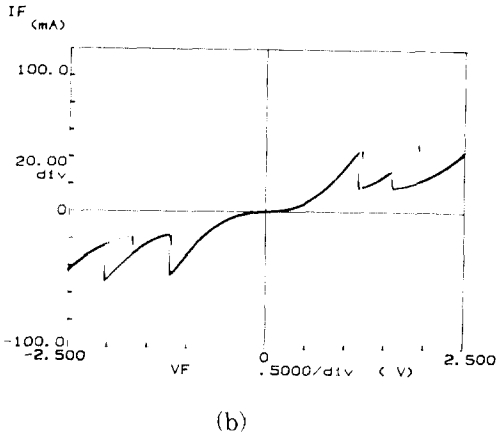
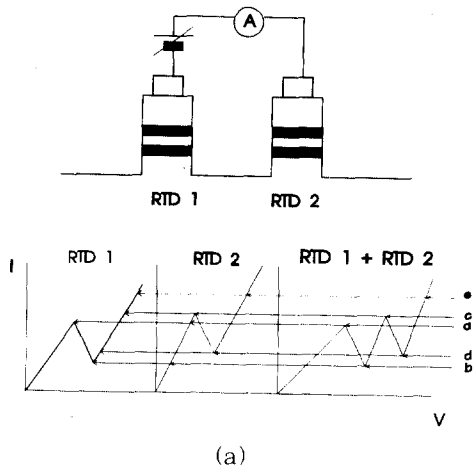


그림 7. (a) 두개의 공명투과다이오드를 직렬로 연결했을때의 동작원리도 및 (b) 전류-전압 특성

Fig. 7. (a) Diagram of operation principle and (b) Current-voltage characteristic by series connected resonant tunneling diodes.

얻을 수 있으므로 원하는 수의 다중피크를 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 다중피크는 다중논리게이트나 multiplier등에 응용이 가능하므로 간단한 공정을 통하여 반도체 회로를 단순화시킬 수 있을 것으로 예측된다.

IV. 결론

AlAs/GaAs/AlAs 구조로 장벽의 폭이 40Å이고, 우물의 폭이 45Å인 공명투과다이오드를 제작하여 실

온에서 전류-전압을 특성을 측정하였다. 그리고 공명 투과다이오드의 쌍안정 특성을 이용하여 NOT, AND, OR 논리게이트와 공명투과다이오드를 이용한 두개의 NOT 논리게이트를 이용하여 Flip-Flop 을 제작하였다. 이와 같이 공명투과다이오드를 이용할 경우는 트랜지스터를 이용할 경우에 비해 하나 혹은 두개의 공명투과다이오드로 동작이 가능하므로 단순화 및 고집적화를 이룰 수 있으며, 공명투과와 고속성을 이용하므로 고속의 스위칭 시간을 갖는 논리 회로를 제작할 수 있을 것으로 기대된다. 그리고 특성이 비슷한 두개의 공명투과다이오드를 직렬로 연결하면 피크전류 및 피크 대 밸리전류의 비가 비슷한 두개의 피크를 얻을 수 있었다. 이러한 결과로부터 공명투과다이오드를 이용한 다중논리회로의 응용가능성을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국통신의 출연금에 의하여 수행되었으며, 이에 대해 감사드립니다.

參考文獻

- [1] L.L. Chang, L. Esaki, R. Tsu, *Appl. Phys. Lett.*, 24, 593(1974).
- [2] T.C.L.G. Sollner, W.D. Goodhue, P.E. Tannenwald, C.D. Parker, and D.D. Peck, *Appl. Phys. Lett.*, 43, 588(1983).
- [3] Tom P.E. Broekaert, Wai Lee, and Clifton G. Fonstad, *Appl. Phys. Lett.*, 53, 1545(1988).
- [4] E.R. Brown, T.C.L.G. Sollner, C.D. Parker, W.D. Goodhue, and C.L. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, 55, 1777 (1989).
- [5] E.R. Brown, J.R. Soderstrom, C.D. Parker, L.J. Mahoney, and K.M. Molvar, T.C. McGill, *Appl. Phys. Lett.*, 58, 2291(1991).
- [6] 오재웅, 오원웅, 유성룡, 백수현, 이상유, 우덕하, 우종천, 1991년도 씨에이디, 전자계산, 반도체, 재료 및 부품 합동 학술발표회 논문집 제 9 권 제 1 호, p235.
- [7] E. Wolak, B.G. Park, K.L. Lear, and J.S. Harris, Jr., *Appl. Phys. Lett.*, 55, 1871(1989).

## — 著 者 紹 介 —



秋 惠 容(正會員)

1964年 8月 3日生. 1987年 2月  
경희대학교 물리학과 졸업(학사).  
1988年 8月 경희대학교 대학원 졸  
업(석사). 1989年 8月 ~ 현재 한  
국전자통신연구소 기초기술연구부  
연구원. 주관심 분야는 양자관통

소자의 설계, 제작 기술 및 전기적, 광학적 특성 연  
구임.

李 昌 憲(正會員) 第 20卷 第 1號 參照

현재 전자통신연구소 선임연구원

朴 炳 雲(正會員)

1956年 8月 18日生. 1981年 연세대학교 물리학과 졸  
업(이학사). 1985年 미국 Indiana University 물리  
학과(이학석사). 1990年 미국 Indiana University  
물리학과(이학박사). 1991年 3月 ~ 현재 한국전자통  
신연구소 기초기술 연구부 선임연구원. 주관심 분야  
는 반도체 양자 수송 및 광학적 특성 연구임.

李 一 恒(正會員) 第 17卷 第 1號 參照

현재 전자통신연구소 선임연구위원  
기초기술 연구부장