

# MODFET의 광반응

김희종 · 김동명\* · 한일기 · 이정일

한국과학기술연구원 광기술연구센터, \*국민대학교 전기공학부

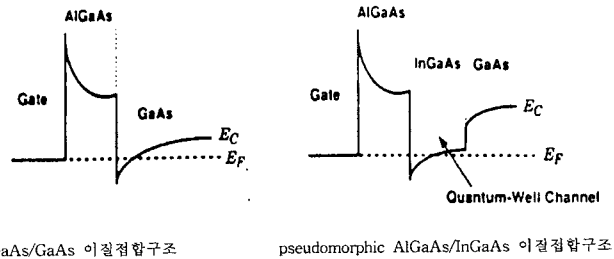
jil@kistep.re.kr

## 1. 서론

변조도핑된 전계효과 트랜지스터(MODFET, 모드펫)은 1978년 당글<sup>[1]</sup>이 이질접합구조를 처음 발표한 뒤 미무라 등<sup>[2]</sup>에 의해 1980년 처음 구현되었으며 이후 MBE, MOCVD, CBE 등의 에피택시 기술의 발전과 함께 중요한 초고속 전자소자로 부상하게 되었다. 먼저 갈비(GaAs)에 기초한 MODFET이 개발되었고, 이어 인린(InP)에 기초한 MODFET이 발전 되었다. 인린 화합물은 광섬유손실이 적은 장파장용 광소자의 재료로도 쓰이므로 한판 집적에 유리하다.

1960년 강대원에 의해 열산화법으로 실리콘 모스펫(금속-산화막-반도체 전계효과 트랜지스터, MOSFET)이 최초로 구현된 이후, 이와 비슷한 반도체-산화막을 실리콘보다 전자 이동도 등이 우수한 저마늄이나 화합물 반도체에 구현하려는 노력이 상당히 있었으나 대부분 실패하였고, 결국 에너지 띠폭 크기가 다른 이질 접합구조에서 2차원 전자 기체를 형성할 수 있게 되어 화합물 반도체에서는 모스펫 대신 모드펫으로 소자가 발전하게 된 것이다. 따라서 모드펫의 동작원리는 모스펫과 비슷하다. 예를 들어, 에너지 띠폭이 큰 알갈비(AlGaAs)와 띠폭이 작은 갈비(GaAs)가 접합되면, 전도띠의 불연속성에 의해 접합면에 형성된 1차원 전위 우물에 알갈비 쪽의 도핑에 의해 생긴 전자들이 넘어 들어와 고이게 되어 2차원 전자 기체를 형성한다. 2차원 전자기체의 농도는 게이트 전압으로 조절할 수 있으므로 전계효과 트랜지스터가 되는 것이다.

그림 1에 알갈비/갈비 이질접합 구조(삼각형 전위 우물)와 알갈비/인갈비/갈비 이종 이질접합구조(사각형 전위 우물)의 띠 그림이 그려져 있다. 이러한 2차원 전자 기체로 이루어진 전도 채널은 채널 영역에 직접 도핑하여 전하 운반자를 얻는 MESFET(금속-반도체 전계효과 트랜지스터)의 자유전자보다 우수한 전자 수송특성을 가지며, 도핑에 의한 클롱 포텐셜이 멀리 떨어져 있으므로 전자 이동도가 월등히 커지므로 우수한 전기적 특성을 갖게 된다. 모드펫은 다른 이름으로 불리기도 하는데 처음 개발한 연구그룹에서 각기 중요하다고 생각하는 특성을 고려하여



AlGaAs/GaAs 이질접합구조 pseudomorphic AlGaAs/InGaAs 이질접합구조

그림 1. 알갈비/갈비 단일 이질접합구조와 알갈비/인갈비/갈비 이종 이질접합구조의 전도띠( $E_C$ ) 그림. 페르미 준위( $E_F$ )가 점선으로 표시되어 있다(n-채널).

붙인 이름이다. 높은 전자-이동도 트랜지스터(HEMT, 후지쥬), 2차원 전자 기체 FET(TEGFET, 톱슨), 선택적으로 도핑된 이질구조 트랜지스터(SDHT, 벨) 등이 그것이다.

모드펫의 우수한 전기적 특성과 낮은 잡음 특성은 민수 및 군사용 전자 시스템에 두루 쓰이고 있다. 유무선통신, 방송, 레이더, 충돌방지, 교통, 미사일유도, 전지구 위치(GPS), 운항 시스템에 단일 또는 한판집적회로의 형태로 마이크로파 영역을 넘어 밀리미터파 영역으로까지 그 속도가 증대되어 사용되고 있다. 표 1<sup>[3]</sup>에 주파수 대역의 명칭을 제시하였는데 모드펫이 전구간을 모두 복개하고 있다고 하여도 과언이 아니다. 갈비 계통의 모드펫은 W-대역까지 인린 계통은 G-, Y-대역 이상의 것들이 보고되고 있다<sup>[4]</sup>.

표 1. 마이크로파 및 밀리미터파 주파수 대역표<sup>[3]</sup>.

Microwave 대역표시	주파수대역 (GHz)	Millimeterwave 대역표시	주파수대역 (GHz)
L-band	1-2	Q-band	33-50
S-band	2-4	U-band	40-60
C-band	4-8	V-band	50-75
X-band	8-12	E-band	60-90
Ku-band	12-18	W-band	75-110
K-band	18-26	D-band	110-170
Ka-band	26-40	G-band	140-220
		Y-band	220-325

반도체의 띠틈보다 큰 에너지를 가진 광자(빛)가 흡수되면 전자-홀 쌍이 형성되어 추가로 전류 운반자로 기여한다. 광 흡수에 의해 생성된 운반자들은 직접 광전도성 효과에 의해 광 전류에 기여하기도 하고 광전압성 효과로 기여하기도 한다. 전통적인 모드펫 구조(그림 1의 왼쪽 경우)에서 생성된 홀은 띠휘어짐에 의해 형성된 높은 전장에 의해 기판 또는 완충층 쪽으로 끌려가 축적되어 게이트-기판 사이에 추가 전위를 제공하여 결과적으로 게이트 전압이 증가된 것과 같은 효과를 내는 것이 광전압성 효과의 한 예이다.

모드펫을 포함한 마이크로파 소자들이 광에 민감한 것은 전통적인 마이크로파 응용에 바람직하지 않았기 때문에 초기에 소자 제작자들은 이를 감소시키려 노력하였다. 그러나 지난 10여 년간 연구자들은 이를 거꾸로 활용하는 방법을 연구해 왔다. 이는 광섬유를 이용한 광통신 및 이와 유사한 응용에서 불가피하게 광전 변환이 필요하게 되는데 그 동기가 있다. 본고에서는 먼저 제 2절에서 모드펫의 광반응을 응용할 수 있는 예들을 살펴보고, 제 3절에서 광반응의 물리적 기구를 논한 후, 제 4, 5절에서 각각 연속 광조사와 변조 광조사에 대한 특성들을 살펴 보기로 한다.

## 2. 응 용

정보화 시대에 요구되는 대용량의 데이터 통신을 가능케 하기 위하여 초고속 광통신 시스템에 대한 연구가 활발해 지고 있으며 마이크로파 한판집적회로 기술을 이용한 광을 매개체로 한 신호 제어는 칩 크기의 축소, 간섭 제거, 우수한 전기적 단절 등의 많은 장점이 있다. 광섬유와 마이크로파의 접촉에는 전통적인 수광소자인 p-i-n 다이오드나 MSM(금속-반도체-금속) 광다이오드 등이 마이크로파 소자와 집적되어 사용되고 있

으나, 표준 한판집적회로 공정기술과의 호환성에 문제가 있어 제작에 제한이 있으며, 여기에 한판집적회로의 기본 단위 소자인 MESFET, MODFET, HBT 등을 직접 수광소자로, 즉 광신호의 입력 단자로 쓰면 여러 가지 이점이 있다.

그림 2에 도시된 바와 같이 모드펫의 광반응을 응용하는 예는 크게 네 가지로 나누어 볼 수 있다<sup>5)</sup>.

(a) 모드펫에 연속 레이저 광이 조사되면 광반응에 의해 마이크로파 신호가 증폭되어 드레인단으로 증폭된 신호가 출력된다. 이를 이용하여 모드펫 증폭기의 이득과 위상 천이기의 위상을 비취 주는 광세기를 바꾸어 줌으로써 조절할 수 있다. 또한 모드펫 진동자의 주파수를 조절할 수 있다.

(b) 모드펫은 MMIC(한판집적 마이크로파 집적회로)의 기본 소자이므로 칩의 한 부분으로써 광신호 검출기능을 담당할 수 있다. 마이크로파 신호가 광섬유를 통하여 분배되는, 광을 이용한 위상 배열 등에 유용하게 쓰일 수 있다. 즉 송수신 모듈의 주요 광검출기로 모드펫이 사용될 수 있다.

(c) 마이크로파 신호를 광으로 변조할 수 있다. 가령 진동자 주파수에 매우 근접하는 변조 주파수의 광을 모드펫에 쬐어 줌으로써 모드펫 진동자의 광주입 잠금을 실현할 수 있다. 이 기술은 특히 광으로 먹여진 위상배열 안테나에서 기준신호를 분배하는데 유리하다. 또한 위상배열용 송수신 모듈 등에 광스위치로도 응용될 수 있으며 이는 광펄스를 모드펫에 쬐어 줌으로써 직접 또는 간접적으로 조절할 수 있다.

(d) 광-전 마이크로파 혼합: 지역 진동자(local oscillator, LO) 신호가 실려진 운반자 광신호를 쬐어 주면 게이트단의 마이크로파 신호와 혼합되어 드레인단에서 중간 주파수(intermediate frequency, IF) 신호가 출력된다.

## 3. 광반응 기구

그림 3에 이중 이질접합 n-형 모드펫에 레이저 광이 조사될 때 전자-홀 쌍이 생성되는 과정을 도시하였다. 입사광의 에너지는 1.55 eV(파장 0.8  $\mu\text{m}$ )로 1.798 eV의 띠틈 에너지를 갖는 알갈비는 투과하고, 각각 1.424 eV와 1.236 eV의 띠틈 에너지를 갖는 갈비와 인갈비에는 흡수되어 전자-홀 쌍이 생성된다. 모드펫 또는 모드펫의 이질접합 계면에 형성된 2차원 전자(홀) 기체의 특성은 70, 80년대에 많이 연구되어 졌다<sup>6)</sup>. 이 연구 결과들은 먼저 알갈비/갈비 모드펫에 먼저 적용이 되었고 후에 유사조성(pseudomorphic) 소자에도 응용이 되었다.

띠휘어짐과 전체 전하를 연결시켜 주는 정전용량을 고려하면 광조사에 의해 유도된 광전압이 페르미 에너지의 변화와 동일 하다는 것을 알 수 있다. 페르미 준위와 양자 우물에서의 양

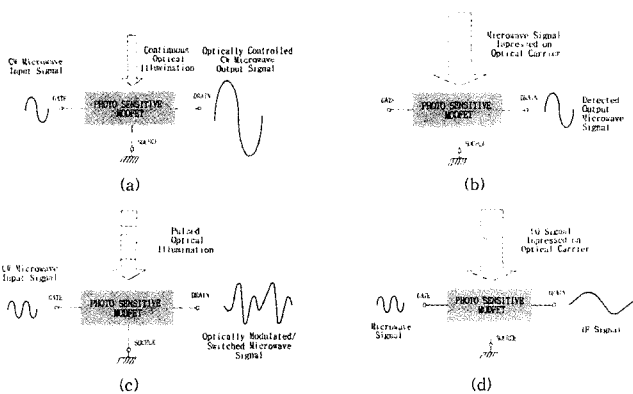
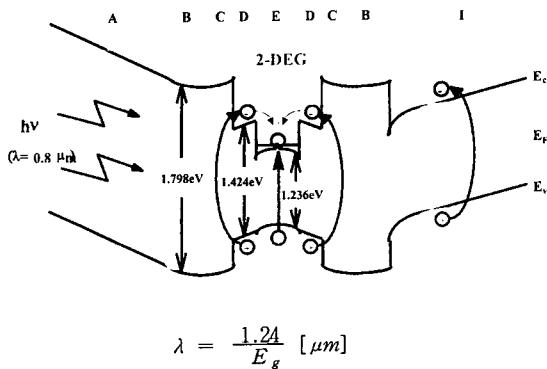


그림 2. 모드펫의 광반응 응용개념도<sup>5)</sup>. (a) 연속 광조사에 의한 증폭기 이득 제어 등, (b) 광-전 신호 검출, (c) 광-전 변조 및 스위칭, (d) 광-전 혼합.



A: Undoped Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	50 nm
B: Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As (1 × 10 <sup>18</sup> /cm <sup>3</sup> : Si)	10 nm
C: Undoped Al <sub>0.3</sub> Ga <sub>0.7</sub> As	5 nm
D: Undoped GaAs	5 nm
E: Undoped In <sub>0.13</sub> Ga <sub>0.87</sub> As	10 nm
I: Undoped GaAs	200 nm

그림 3. 이중 이질접합 n-채널 모드펫에 레이저 광이 조사될 때 전자-호일 쌍의 생성.

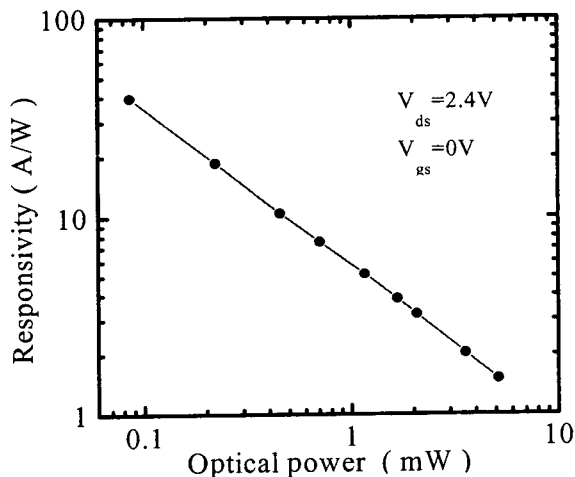


그림 4. n-채널 모드펫의 광세기에 따른 광반응도의 변화.

자화된 전자 에너지 상태를 포괄하는 운반자 통계로부터 광세기와 유도된 광전압의 로그 함수관계를 얻을 수 있다<sup>7)</sup>. 유도된 광전압은 모드펫의 문턱전압 변화와 동일하므로 광세기와 문턱전압 변화 또는 광전류의 관계가 로그 함수 관계임을 유도할 수 있다. 즉 문턱전압의 변화는 광세기가 세어짐에 따라 포화 현상을 보이게 된다. 이러한 강력한 비선형성이 모드펫 광반응의 중요 특성이다.

광전류 대 광세기(optical power)의 비율로 정의되는 광반응도의 지수적인 관계도 이에 기인한다. 그림 4에 조사된 광세기에 따른 n-형 모드펫의 광반응도의 변화가 제시되어 있다<sup>8)</sup>. 최소 광세기에서 약 40 A/W의 광반응도를 보이고 있는데 이는

MESFET이나 p-i-n 다이오드의 광반응도보다 월등히 우수한 결과이다. 미앤더식 게이트 구조와 손가락형 소오스-드레인 전극을 사용하여 1.3 μm 파장에서 0.011 mW 입사광 세기에 대해 200 A/W이상의 광반응도를 보이는 인알비/인갈비(InAlAs/InGaAs) 소자가 보고되고 있다<sup>9)</sup>. 모드펫의 광반응에 대한 연구는 n-채널 소자에 대한 것이 주종을 이루고 있으나<sup>7-10)</sup>, p-채널 소자에 대한 연구도 수행되었다<sup>11-12)</sup>. p-채널 소자의 관건은 통상 원자가띠의 차이가 적은 점(전위 우물이 얕아져서 호일 구속이 비효율적인 점)과 작은 호일 이동도를 극복하는 것이다. 따라서 에너지 띠틈이 큰 장벽층을 채용해야 하며 단일 이질접합보다는 이중 이질접합이 효과적이다.

문턱전압 변화의 비선형성을 설명하기 위하여 평행 전도를 고려하기도 한다<sup>13)</sup>. 광조사에 의해 전도 채널에 생성된 운반자들의 일부가 장벽층으로 넘어가면 장벽층의 도핑된 영역에서는 불순물의 클롱 산란에 의해 이동도가 현저히 떨어지므로 전도도가 극히 빈약한 전도 채널(MESFET과 같은)을 형성하게 되며, 광세기가 강해질수록 장벽층으로 넘어가는 운반자의 수의 비율이 커지므로 전체 광전류는 포화되는 경향을 보일 수 있다. 광조사에 의해 생성된 운반자들은 전류-전압 관계의 포화 영역(즉, 큰 소오스-드레인 바이어스)에서의 유효 채널 길이를 변화시킨다. 유효채널 길이의 광반응도 모드펫의 광전류의 거동에 기여한다.

#### 4. 연속 광조사에 대한 반응

광조사는 결과적으로 게이트 바이어스를 증가시키는 것과 같은 효과를 주기 때문에 마이크로파 소자의 특성을 향상시킨다. 문턱 전압의 변화 뿐 아니라 기생저항을 줄이고 전달 컨덕턴스의 향상도 초래한다. 특히 전달 컨덕턴스는 마이크로파 특성에 직접 영향을 주므로 마이크로파 특성도 향상된다. 광을 조사했을때의 전류에서 광을 조사하지 않았을 때의 전류를 뺀 것으로 정의되는 광전류의 거동은 트랜지스터 거동과 비슷하다. 즉 적은 소오스-드레인 바이어스에서는 게이트 전압의 변화에 선형적으로 변하며 소오스-드레인 전압이 일정 전압 이상이 되면 포화되거나 감소한다. 이러한 경향은 n-채널이나 p-채널 소자에서 공통적으로 관측된다. 게이트-소오스 바이어스의 증가에 따른 전달 컨덕턴스 곡선은 광조사에 의해 문턱 전압만큼 이동하는 외에도 최대 전달 컨덕턴스가 증가하는 것이 관측되었다.

광조사에 대한 민감 정도를 나타내는 지표로는 광조사가 있을 때와 없을 때의 드레인 전류비가 있다. 이 전류비는 포화영역에서 게이트 전압이 문턱 전압 근처일 때 최대치를 보이는데

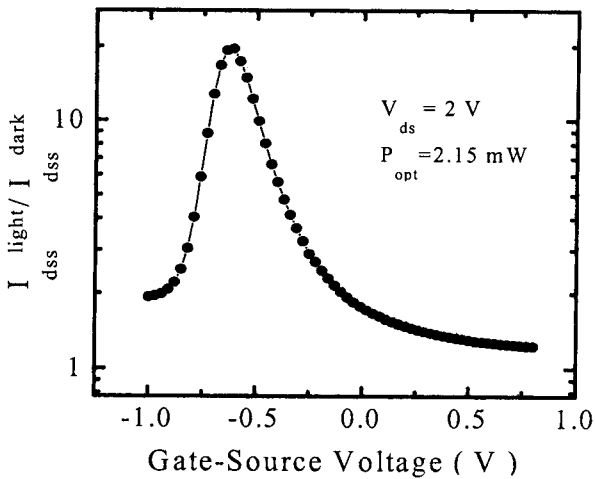


그림 5. 광조사 유무시 드레인-소오스 포화 전류의 게이트-소오스 전압에 대한 변화(n-채널).

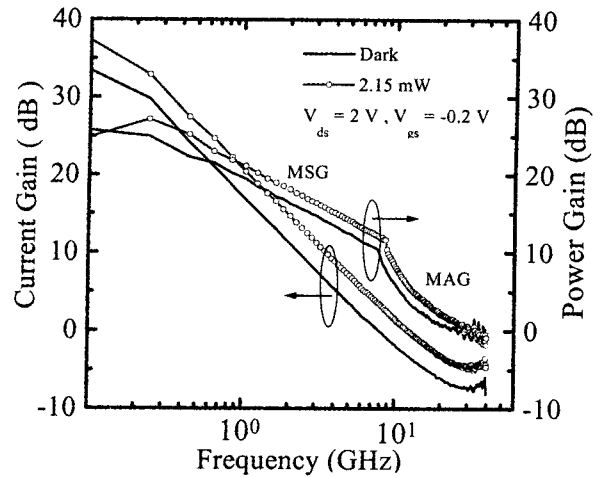


그림 6. n-채널 모드펫의 동작 주파수에 따른 전류이득과 전력이득의 광반응 특성.

이는 이 조건에서 공핍층이 제일 넓어지기 때문이다(그림 5). 문턱 전압보다 큰 게이트 바이어스에서는 채널에 반전층이 형성되어 전류는 표류(drift)에 의해 흐르고 문턱 전압 이하의 바이어스에서는 공핍층이 형성되어 확산(diffusion)에 의해 통하게 된다. 즉 드레인 전류의 게이트 전압 의존도는 포화영역에서 게이트 전압이 감소함에 따라 게이트 전압의 자승에 비례해 감소하다가 문턱 전압을 지나면 지수적으로 감소하게 된다. 이 전류비는 신호 대 잡음비에 해당하며 광세기에 거의 선형적으로 비례하므로 광검출기로의 응용이 가능하다<sup>14)</sup>.

마이크로파 소자의 속도 또는 동작 주파수 한계를 나타내는 지표로는 전류이득 차단 주파수  $f_t$ 와 전력이득 차단 주파수  $f_{max}$ 가 있다.  $f_t$ 는 전류이득이 1로 떨어지는 주파수인데 주로 운반자가 소자를 가로지르는 거리와 정전용량에 의해 결정된다.  $f_{max}$ 는 전력이득이 1로 떨어지는 주파수로서 그 소자에서 진동(oscillation)이 일어날 수 있는 최대 주파수이며 주로 접합저항 같은 기생성분에 의해 좌우된다. 광조사에 의해 정전용량이나 기생성분 등이 변화되므로 마이크로파 특성에 영향을 주게 된다<sup>15)</sup>. 지표 주파수는 산란 계수인 S-매개인자의 측정으로부터 계산해 낼 수 있다. 측정에 의하면, 광조사시 단절항인  $S_{12}$ 와 출력 산란 계수인  $S_{22}$ 는 거의 변하지 않으나, 입력 산란 계수인  $S_{11}$ 과 이득 산란 계수인  $S_{21}$ 은 많은 변화를 보인다.

그림 6에 광조사된 이중 이질접합 갈라비/갈라비/인갈비 n-채널 모드펫의 마이크로파 특성이 예시되어 있다. 주어진 전압 조건(소오스-드레인 바이어스 2 V, 게이트-소오스 바이어스 -0.2 V)와 입사광 세기(2.15 mW)에서, 암흑 상태에서 결정된  $f_t$ 는 7.97 GHz,  $f_{max}$ 는 26.76 GHz이었는데 광조사시 각각 12.18 GHz와 31.35 GHz로 증가하였다. 이러한 증가 경향은 이 지표

주파수들에 영향을 주는 전달컨덕턴스, 게이트-소오스 정전용량, 출력컨덕턴스, 게이트-드레인 정전용량, 기생저항 같은 등가회로 매개 변수의 광반응 특성 변화에 의해 결정되어 지며, 소자의 설계, 구조에 의해 결정되는 입사광 흡수층의 두께, 게이트 길이, 운반자의 포화 속도 등의 변수가 소자의 광반응 특성에 기여하는 것이다<sup>15)</sup>.

## 5. 변조 광조사에 대한 반응

본절에서는 그림 2에 도시된 모드펫의 광반응 응용 예 중 (b)-(c)에 해당하는 변조된 광조사, 즉 시간에 따라 광세기가 바뀌는 광조사에 대해 살펴본다. 광변조는 a) 통신 연결을 위한 소신호 삼각함수 변조와, b) 스위칭 응용을 위한 대신호 정방파 변조로 나눌 수 있다. 변조된 광에 대한 모드펫의 반응은 연소 광조사에 대한 반응과 같은 맥락에서 분석할 수 있으나, 단지 제 2절에서 언급된 여러 가지 광반응기구에 관련된 시간 상수들이 고려되어야 한다.

로메로 등<sup>7)</sup>은 모드펫과 p-i-n 다이오드를 비교하여 소신호 광변조에 대한 반응을 조사하였는데 모드펫이 작은 광세기와 낮은 변조 주파수에서 p-i-n 다이오드보다 우수한 특성을 보임을 밝혔다. 모드펫의 주파수 대역폭은 수 MHz 정도인 것으로 측정되었다. 모드펫의 비교적 느린 반응은 호몰의 수명이 길기 때문이다. 이는 높은 이득을 주는 대신 속도를 지체시킨다. 긴 호몰의 수명은 광반응에 의해 생성된 전자와 호몰이 공간적으로 떨어져 있기 때문에 결합 확률이 감소된데 연유한다. 다카나시 등<sup>10)</sup>은 인갈비/인갈비 이중 이질접합 모드펫에서 광전도성 효과와 광전압성 효과에 대해 따로 측정한 결과, 광전압성

효과에서는 45 MHz, 광전도성 효과에서는 무려 37 GHz의 높은 대역폭을 얻었다고 보고하였다. 대신호 펄스 광조사에서 ps 급의 빠른 반응이 측정되기도 했으나<sup>16)</sup>, 이는 주로 광전도성 효과에 대한 반응으로서 이득에 기여하지 않는다. 반응속도를 제고하기 위하여서는 이득을 희생시키지 않으면서 호몰의 수명을 단축시켜야 하는데, 이를 위해 기관 쪽에 추가 단자를 설치하여 잉여 호몰을 뽑아 내는 “호몰-구덩이”가 제안되기도 했다<sup>7)</sup>.

## 6. 결론

이상으로 모드펫의 광반응의 응용과 광반응 기구, 구체적인 반응 거동들을 음미해 보았으며 연속 광조사와 변조 광조사에 대해서도 논의해 보았다. 광조사에 의해 모드펫의 특성은 일반적으로 향상되며, 낮은 광세기와 낮은 주파수에서 모드펫은 높은 이득을 보이는 등, 기존의 수광소자보다 월등히 우수한 특성을 보임을 알 수 있다. 변조광에 대한 모드펫의 반응은 비교적 느린 편이어서 이를 해결하기 위한 대책이 강구되어야 실제 해당 부분의 응용이 구현될 것이다. 그러나 주입 잠금이나 광 또는 광-전 혼합 등은 기존의 수광소자로는 불가능하며 모드펫같은 마이크로파 소자만이 할 수 있는 것이다. 더욱이 모드펫은 초고주파 한파 집적회로의 기본 단위 소자이므로 칩 크기의 축소 등 집적에 용이한 장점이 있다. 고급 유무선 통합 통신 시스템에 모드펫의 광반응 특성이 유용하게 쓰일 것으로 전망된다.

## 참고문헌

1. R. Dingle, H. L. Stormer, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, *Appl. Phys. Lett.*, 33(7), 665(1978)
2. T. Mimura, S. Hiyamizu, T. Fuji, and K. Nanbu, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 19, L225(1980)
3. K. Chang, *Microwave Solid-State Circuits and Applications*, Wiley

- and Sons Inc., New York, 1994, Ch. 1.
4. G. Raghavan, M. Sokolich, and W. E. Stanchina, *IEEE Spectrum*, Oct. 2000, p.47.
5. R. N. Simons, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, MTT-35(12), 1444(1987)
6. T. Ando, A. B. Fowler, and F. Stern, *Rev. Mod. Phys.*, 54, 437(1982)
7. M. A. Romero, M. A. G. Martinez, and P. R. Herzfeld, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 44, 2279(1996)
8. 김희중, 박사학위논문, 서강대학교, 1997.
9. M. Marso, P. Gersdorf, A. Fox, A. Forster, U. Hodel, R. Lambertini, and P. Kordos, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 11(1), 117(1999)
10. Y. Takanashi, K. Takahata, and Y. Muramoto, *IEEE Trans. Electron Devices*, 46, 2271(1999)
11. Y. V. Ponomarev, A. Usher, M. Hayne, P. J. Rogers, B. L. Gallagher, M. Henini, and G. Hill, *Solid-St. Commun.*, 102(1), 53(1997)
12. H. J. Kim, D. M. Kim, D. H. Woo, S. I. Kim, S. H. Kim, J. I. Lee, K. N. Kang, and K. Cho, *Appl. Phys. Lett.*, 72(5), 584(1998)
13. D. M. Kim, S. H. Song, H. J. Kim, and K. N. Kang, *IEEE Electron Device Lett.*, 20(2), 73(1999)
14. I. K. Han, H. J. Kim, D. M. Kim, and J. I. Lee, 2nd Korea-Japan Workshop on Microwave-Photonics, FEB. 1-2, 2001, Yonsei Univ., Seoul, Korea.
15. S. H. Song, D. M. Kim, H. J. Kim, S. H. Kim, K. N. Kang, and M. I. Nathan, *IEEE Microwave & Guided Wave Lett.*, 8(1), 35(1998)
16. M. Z. Martin, F. K. Oshita, M. Matloubian, H. R. Fetterman, L. Shaw, and K. L. Tan, *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 4(9), 1012(1992)

## 저자약력

성 명 : 김희중 · 김동명\* · 한일기 · 이정일  
 근무처 : 한국과학기술연구원 광기술연구센터  
 \*국민대학교 전기공학부  
 E-mail : jil@kistep.re.kr