

InAs/InGaAs 양자점을 이용한 전계광학변조기

옥성해 · 문연태 · 최영완[†]

중앙대학교 전자전기공학부 전파 광파 통신 연구실
Ⓣ 156-756 서울 동작구 흑석동 221번지

손창완 · 이석 · 우덕하 · 변영태 · 전영민 · 김선호

한국과학기술연구원 광기술연구센터
Ⓣ 136-791 서울 성북구 하월곡동 39-1번지

이종창

홍익대학교 전자전기공학부
Ⓣ 121-791 서울 마포구 상수동 72-1 번지

오재응

한양대학교 전자전기제어계측 대학원
Ⓣ 133-791 서울 성동구 행당동 17

(2006년 4월 17일 받음, 2006년 6월 13일 수정본 받음)

본 연구에서는 광통신 시스템에서의 고속변조를 위하여 사용되는 전계광학 변조기를 구현하기 위하여 InAs 양자점(Quantum Dots)을 변조영역으로 하는 전계광학 변조기를 설계, 제작하였다. 제작한 양자점 전계광학 변조기에서 1550 nm의 파장을 가지는 입력광의 변조 특성을 측정하여 벌크(Bulk)형태의 변조영역을 가지는 동일한 구조의 전계광학 변조기와 비교하였다. 위상변조효율은 TE 모드에서 $333.3 \text{ }^\circ/\text{V} \cdot \text{mm}$, TM 모드에서 $300 \text{ }^\circ/\text{V} \cdot \text{mm}$ 로 측정되었으며, 기존의 벌크로 변조영역이 구성된 전계광학 변조기와 동일한 소자구조를 가지는 전계광학 변조기에 비해 편광의존도가 낮으며 위상변조효율이 20배 이상 향상된 결과를 얻었으며, 양자우물구조에 비하여는 3배 이상의 높은 위상변조효율을 얻었다.

주제어 : Quantum dots, Electrooptic modulator, Optoelectronics.

I 서 론

광통신 시스템에서의 고속변조를 위하여 외부변조기를 사용하게 되는데 레이저와의 단일집적, 작은 구동전력에서 고속 동작, 그리고 변조 시 좁은 선폭을 갖는 것 등이 중요하다. 현재 낮은 구동전압과 높은 변조효율, 그리고 고주파수 응답특성을 갖는 III-V족 화합물 반도체 물질을 사용한 광변조기의 연구가 활발히 진행되고 있으며 대부분의 화합물 반도체 소자들은 밴드갭 엔지니어링을 통한 양자효과를 소자 구조에 이용하고 있다. 실용화된 소자들은 주로 양자우물구조(Quantum Well)를 사용하고 있으나 소자의 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 2차원적인 양자우물에서 보다 높은 수준의 양자구조인 0차원적인 양자점(Quantum Dots)으로 양자 구조의 차원을 더욱 줄여야하는 필요성이 이론적으로 제시되어있다. 실제로 1982년에 Y. Arakawa에 의해 물질이 수십 nm 수준에서 저차원적으로 형성될 경우 독특한 물리적 현상

을 가지고, 이를 이용할 경우 양자우물보다 좋은 광학적 성질을 가질 수 있음이 이론으로 제안된 이후^[1], 양자점 연구는 활성화 되었다. 반도체 양자점 구조의 영차원적 양자제한 효과는 양자우물 구조에 비하여 이론적으로 우수한 전자수송 특성과 광학적 특성을 갖는다. H. Sakaki 는 양자선과 양자점 같은 저차원 양자구조에서 전자의 이온 불순물 산란이 급격히 감소하는 것을 보여 주었다. 결과적으로 저온에서 전자의 이동도와 평균자유경로(mean free path)가 증가하며 또한 서브밴드갭이 전자의 평균 운동에너지와 광학포논 에너지 $\hbar\omega_{\text{op}}$ 보다 넓고 서브밴드폭이 $\hbar\omega_{\text{op}}$ 보다 좁을 때 광학포논 산란이 억제될 수 있어 고온에서 전자의 이동도와 평균 자유 경로가 증가하는 장점을 갖는다.^[2] 현재 GaAs 기판위에 Stranski-Krastanow(S-K) 방법으로 InAs 양자점을 성장하여 레이저 다이오드나 Memory, 장파장 광 검출기 등과 같은 광소자에 응용하는 기술은 널리 연구되고 있다.^[3-5] 본 연구에서는 기존의 III-V족 반도체 광변조기가 변조영역으로 벌크(Bulk) 또는 양자우물을 이용하는 것에 비해 변조영역을 양자점으로 구성하여 소자에 인가되는 전계의 작은 변화에 따

[†] E-mail: ychoi@cau.ac.kr

Thickness	Layer	Doping
200 nm	GaAs	$P^+ = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
1000 nm	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	$P = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
300 nm	GaAs	Undoped
16 nm	InAs (Quantum dot)	Undoped
300 nm	GaAs	Undoped
2000 nm	$\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	$N = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
300 nm	GaAs	$N^+ > 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Substrate	GaAs	N^+

그림 1. 양자점 전계광학변조기의 에피택시 구조.

라 광학적 특성의 변화를 증가시킴으로써 낮은 동작전압과 낮은 스위칭 전압을 갖으며 높은 위상변조효율을 갖는 광변조기를 구현하였다.

II. 양자점 전계광학변조기의 설계 및 제작

본 연구에서 제작된 전계광학 변조기는 Mach-Zehnder 형태로 제작 하였다. Mach-Zehnder 형태의 전계광학 변조기는 두개의 도파로가 서로 평행하게 구성되어 있는 구조를 가진다. 전기광학 물질위에 만들어진 변조기의 입력부분에 입사되는 빛은 서로 다른 두개의 도파로 경로를 거쳐 다시 하나의 빛으로 합쳐진다. 이때 한쪽 경로에 전계를 가하게 되면 그 부분에서 굴절률이 변하게 되고 위상변화를 일으켜 다른 경로를 거쳐 온 빛과 보강 또는 상쇄간섭을 일으켜 입력 신호의 변조가 가능하다.

2.1 양자점 전계광학 변조기의 에피택시

그림 1은 Mach-Zehnder 형태의 양자점 전계광학 변조기의 제작을 위한 에피택시 구조이다. N^+ -GaAs 기판 위에 300 nm 두께의 N^+ -GaAs 채널층을 사용했으며 그 위에 2000 nm의 n-AlGaAs 층을 성장하였다. 진성영역은 광의 구속을 증가시키기 위해 변조영역인 양자점 부분의 위쪽과 아래쪽에 각각 300 nm 두께를 가지는 GaAs층을 배치하였고 양자점 효과를 보다 크게 하기 위하여 coupled stack 형태의 InAs 양자점을 성장하였다. 진성영역 위쪽에 1000 nm 두께의 p-AlGaAs 층과 200 nm 두께의 P^+ GaAs 층을 성장하였다. 변조영역을 담당하는 양자점 영역은 MBE (Molecular Beam Epitaxy)를 사용하여 양자점 성장방식의 하나인 S-K 방식으로 성장하였고 양자점의 구조는 InAs로 구성된 양자점과 $\text{In}_{0.13}\text{Ga}_{0.87}\text{As}$ 로 구성된 wetting 층이 교대로 성장된 5층의 coupled stack 형태로 성장하였다. 그림 2 (a)는 양자점 전계광학 변조기 제작에 사용된 에피택시의 양자점 부분의 TEM 사진이며 그림 2 (b)는 상온과 저온(12 K)에서 측정된 에피택시의 Photoluminescence(PL) 측정결과이다. TEM 사진에 보이듯이 성장된 InAs 양자점의 높이는 16 nm 정도이며 상온과 저온(12 K)에서의 PL의 peak는 각각 1257 nm, 1158 nm에서 측정되었고,



그림 2. (a) 양자점 전계광학변조기의 TEM 사진.

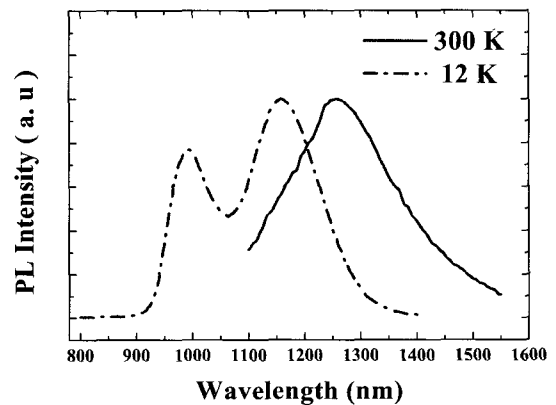


그림 2. (b) 상온(R.T.)과 저온(12 K)에서의 PL.

성장 방식의 특성상 양자점의 크기와 형태가 다양하게 형성되어 있기 때문에 PL의 FWHM(Full Width Half Maximum) 특성이 넓은 파장대역에 분포하였다.

2.2 양자점 전계광학 변조기의 모델링 및 제작

그림 3 (a)는 Mach-Zehnder 형태의 양자점 전계광학 변조기의 구조이고 그림 3 (b)는 제작한 양자점 전계광학 변조기의 현미경 사진이다. 양자점 전계광학 변조기의 광 구속 효과와 단일모드 도파를 위한 광도파로 구조를 얻기 위해 3차원 빔 전파방법(3D Beam Propagation Method: BPM)으로 모의실험을 통하여 에피택시 구조와 도파로의 폭, 식각 깊이 등을 결정하였다. BPM을 사용하여 계산한 결과로 단일모드 도파를 위한 최적의 광도파로 구조는 폭이 3 μm 이고 식각 깊이는 2.8 μm 로 계산되었으나 공정 조건을 고려하여 도파관에서 단일모드가 형성되는 조건을 만족하는 도파관 폭인 4 μm 로 제작하였다. 입력단과 출력단의 길이는 1000 μm 이며 변조영역으로 동작하는 암(Arm)의 길이와 양쪽 Y 분기의

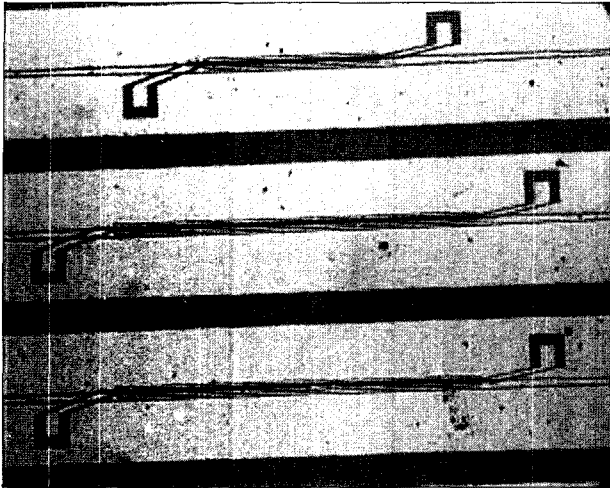
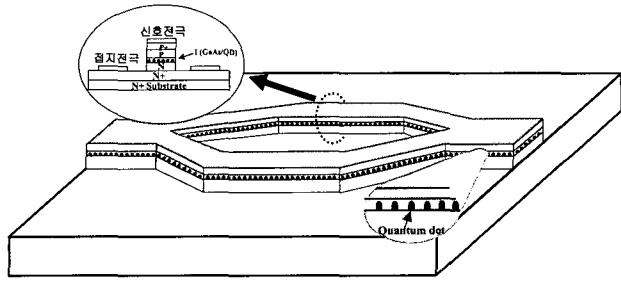


그림 3. (a) 양자점 전계광학변조기의 구조. (b) 양자점 전계광학변조기의 현미경 사진.

길이는 각각 1000 μm 와 2300 μm 이다. 본 연구에서 제작한 양자점 전계광학 변조기의 고속동작 구현을 위해 특성임피던스를 계산하여 전극의 구조를 설계 하였다. 도파관 폭과 신호전극과 접지전극 사이의 간격을 변화시키면서 3차원 FDTD(Finite Difference Time Domain Method)^[6]를 사용하여 특성임피던스를 계산하였다. 그림 3의 구조에서 도파관의 폭이 2 μm 일 때 소자와 외부 바이어스 회로간의 임피던스 매칭이 용이하지만 공정조건을 고려하여 도파관의 폭을 4 μm 로 결정하였다. 이때 발생한 임피던스 미스매칭은 신호전극과 접지전극 사이의 간격을 조정하여 특성 임피던스를 조정하였고 계산 결과는 그림 4에 나타내었다. 신호전극과 접지전극 사이의 간격이 8 μm 일 때 주파수가 40 GHz 이상에서 계산된 특성 임피던스가 45 Ω 이므로 도파관과 패드 사이의 전극을 테이퍼 형태로 구성하여 임피던스 트랜스포머(Transformer)역할을 하도록 설계하여 소자의 특성임피던스가 50 Ω 이 되도록 하였다. 신호전압을 입력하고 출력하기 위한 Pad영역의 신호전극의 폭은 80 μm , 패드 영역에서의 신호전극과 접지전극 사이의 간격 45 μm 로 제작하였다.

III. 실험결과 및 분석

제작한 양자점 전계광학 변조기의 변조 특성을 측정하기

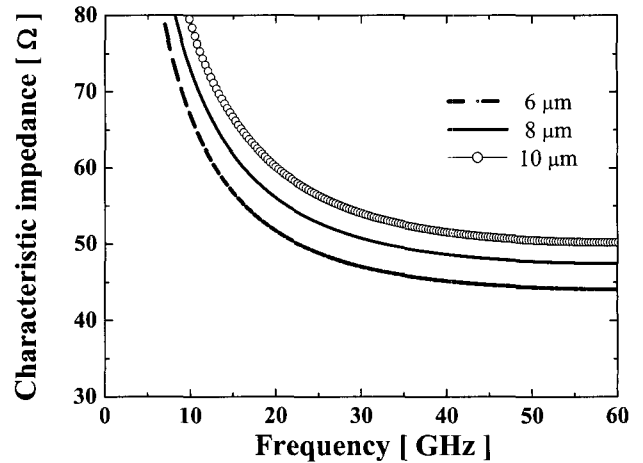


그림 4. 신호전극과 접지전극 사이의 간격변화에 따른 양자점 전계 광학변조기의 특성임피던스(도파관의 폭 : 4 μm)

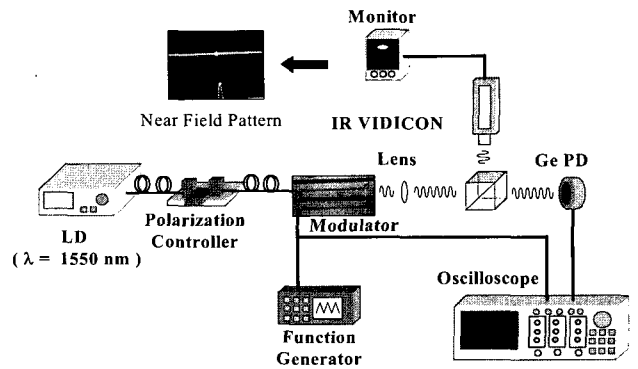
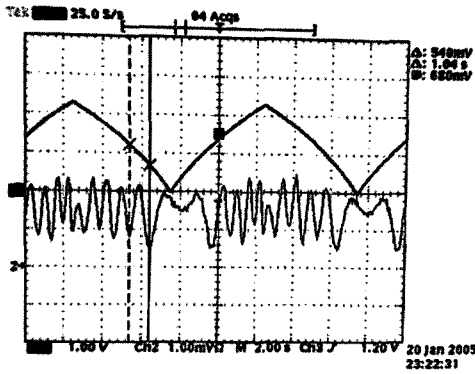


그림 5. 변조효율 측정을 위한 측정 구성도.

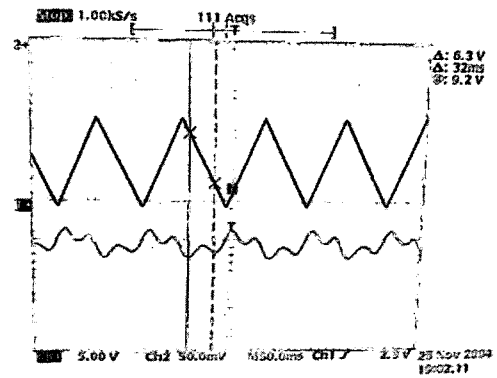
위하여 그림 5와 같은 측정 구성을 하였다. 편광 조절기(Polarization controller)를 거쳐서 TE 모드, 또는 TM 모드로 편광된 입력광을 lensed fiber를 사용하여 양자점 전계광학 변조기에 결합하고, 위상변조된 출력광은 대물렌즈를 통하여 확대되어 IR 카메라에 연결된 모니터로 단일모드를 확인하고, 게르마늄 광 검출기로 오실로스코프에 연결하여 출력 신호의 변조특성을 살펴보았다. 변조기에 인가될 입력 전압 신호는 신호발생기를 통해 삼각파형 전압을 발생시켜 변조기에 인가하고, 게르마늄 광 검출기를 통하여 받은 출력 신호는 오실로스코프를 통하여 전기신호 형태로 볼 수 있게 된다.

3.1 양자점 전계광학 변조기의 측정

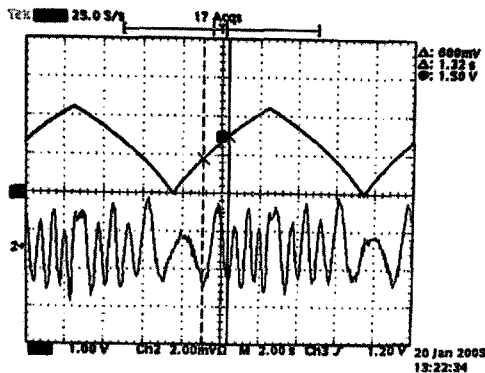
신호발생기를 통하여 양자점 전계광학 변조기에 인가되는 전압으로 2.2 Vpp의 삼각파형 전압을 0.5 Hz의 주파수로 -1.1 V의 바이어스 전압을 가지도록 하여 인가하였고 이때 입력되는 광 신호는 파장이 1550 nm, 광세기가 6 dBm이었다. 그림 6 (a)와 (b)는 변조되어 출력되는 광신호를 광 검출기로 수광하여 오실로스코프를 통하여 출력신호를 측정한다



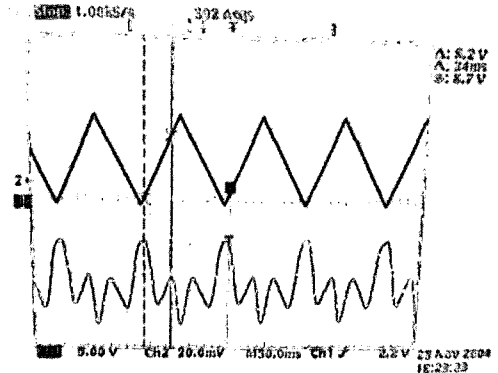
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 6. 양자점 전계광학변조기의 입력 전압에 대한 출력 광신호.
(a) TE mode, (b) TM mode

그림 7. 벌크 전계광학변조기의 입력 전압에 대한 출력 광신호.
(a) TE mode, (b) TM mode

결과이다. 레이저 다이오드에서 출력되는 광을 편광조절기를 사용하여 각각 TE 편광 시킨 경우(그림 6 (a))와 TM 편광 시킨 경우(그림 6 (b))에 대해서 변조되어 출력된 신호가 첫 번째 피크에서 두 번째 피크까지 바뀌는 스위칭 전압이 각각 540 mV와 600 mV로 측정되었다. 그림 6(a) 와 (b) 에서 보듯이 제작한 전계광학 변조기에 인가되는 전압이 증가함에 따라 출력되는 광 패턴의 간격이 비선형적으로 측정되었다. 이 결과로 전계광학 변조기에서 굴절률의 변화를 일으키는 효과 중, QEO(Quadratic Electro-Optic)효과가 더 크게 작용함을 알 수 있다. 양자점은 편광의 변화에 대하여 낮은 의존도를 보이는 특성이 있는데 본 실험에서 측정 시, TE 편광인 경우에 비하여 TM 편광인 경우의 스위칭 전압이 더 작게 측정되었다. 그 원인은 양자점 변조기의 에피택시 구조에서 변조영역으로 동작하는 진성영역이 양자점 뿐만 아니라 광 구속을 증가시키기 위한 전체 두께가 600 nm인 GaAs로 구성된 벌크를 포함하고 있기 때문에 양자점에 의한 굴절률 변화와 더불어 벌크물질에 의한 굴절률 변화가 중첩되어 나타나기 때문이다. 즉 벌크물질로 변조영역을 구성했을 경우 나타나는 TE, TM의 편광에 따른 위상변조 요인의 차이에 따라 발생한 것이다. 그러나 편광의 변화에 따른 스위칭 전

압의 차이가 60 mV에 불과하므로 일반적인 벌크로 구성된 변조기에 비해 편광 의존도가 작은 특성을 가지고 있다.

3.2 벌크 전계광학 변조기의 측정

양자점 변조영역의 효과를 비교하기 위하여 변조영역을 벌크 형태의 AlGaAs로 대체하고 이외의 부분은 동일한 에피택시를 사용하여 변조영역이 벌크로 구성된 전계광학 변조기를 제작, 측정하였다. 변조영역이 벌크로 구성된 전계광학 변조기는 위상 변조효율이 낮기 때문에 변조영역의 길이는 2000 μm 로 양자점 변조기보다 2배 길게 제작하였다. 측정 구성은 양자점 변조기의 측정구성과 동일하며 인가된 전압의 크기를 11 V_{pp}, 바이어스 전압은 -5.5 V로 인가하였으며 출력된 광의 크기가 첫 번째 피크에서 두 번째 피크까지 바뀌는 전압이 TE 편광의 경우 6.3 V 와 TM 편광일 경우 8.2 V 로 측정되었다. 벌크 전계광학 변조기의 TE 모드와 TM 모드에서의 측정 결과는 그림 7(a)와 7(b)에 나타내었다. 측정값은 일반적인 AlGaAs 벌크 구조의 광변조기의 값과 거의 유사하게 측정되었다. 단위길이 당 필요한 스위칭 전압 (Voltage-length product, $V\pi \cdot L$)은 TE 편광일 경우 12.6 V·mm, TM 편광일 경우 16.4 V·mm 이므로 변조영역으로서

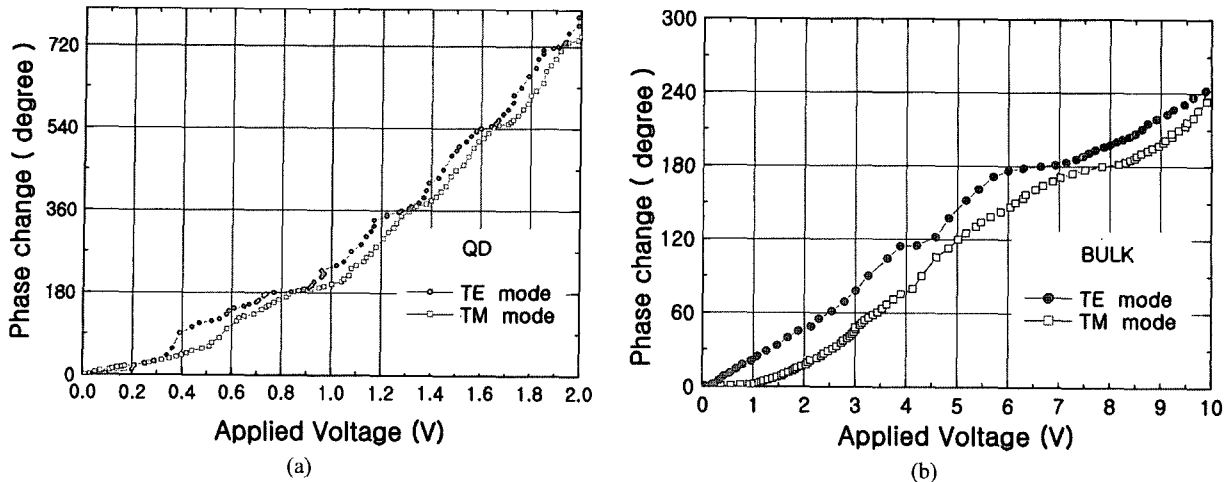


그림 8. 위상변조효율
(a) 양자점 전계광학변조기, (b) 벌크 전계광학변조기

표 1. 도파관의 구조와 구성물질에 따른 전계광학 변조기의 위상변조효율

Type	Material	Structure	$V\pi \cdot L$ (V × mm)	Modulation efficiency (% / V · mm)	Wavelength (nm)	Ref.
Optical Phase Modulator	Bulk	PpinN GaAs / AlGaAs	4.8 × 0.63	37.5	1300	7
		PPpinNN GaAs / AlGaAs	2.6 × 2	34.6	1310	8
		nip InGaAs / InP	15 × 1	12	1520	9
		PinN GaInAsP / InP	8.2 × 2	11	1520	10
		MQW	PinN InP / GaInAsP	1.1 × 4	39	1520
		PiN InGaAlAs / InAlAs	3.8 × 0.3	157.9	1550	12
Mach- Zehnder Intensity Modulator	Bulk	Undoped GaAs / AlGaAs	16.8 × 10	1.07	1550	13
	MQW	PiN InGaAs / InP	6 × 0.3	100	1550	14
		PiN InGaAs / InP	4 × 0.6	75	1550	15
	Bulk	PiN GaAs / AlGaAs	6.3 × 2	14.28	1550	This work
	QD	PiN InAs / InGaAs	0.54 × 1	333.3	1550	This work

양자점을 포함하고 있는 변조기의 스위칭 전압이 거의 20배 이상 우수함을 알 수 있다.

3.3 위상변조효율

변조영역으로 각각 양자점과 벌크를 가지는 전계광학 변조기의 위상변조효율을 파장과 편광에 따라서 그림 8에 나타내었다. 양자점 전계광학 변조기에서 1550 nm 파장을 가지는 입력광의 경우 TE 편광과 TM 편광에서 위상 변조효율이 각각 333.3 %/V · mm, 300 %/V · mm이었고, 벌크 전계광학 변조기의 경우 1550 nm 파장의 입력광에서 TE 편광과 TM 편

광의 위상 변조효율이 각각 14.29 %/V · mm, 10.98 %/V · mm로 측정 되었다. 이와 같은 결과는 양자점을 전계광학 변조기의 변조영역으로 사용함으로써 기존의 벌크 전계광학 변조기에 비해 20배 이상의 높은 위상변조효율을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제작한 양자점 전계광학 변조기의 특성과 지금까지 제작되어온 다른 변조기들의 특성을 비교하여 표 1에 나타내었다. 벌크구조의 전계광학 변조기는 위상 변조효율이 37.5 %/V · mm가 발표[S. S. Lee, 1991]되어있고, 양자우물 구조의 전계광학 변조기는 157.9 %/V · mm가 발표[K.

Wakita, 1992]되었다. 양자우물구조를 갖는 Mach-Zehnder 전계광학 변조기는 $100 \text{ }^\circ/\text{V}\cdot\text{mm}$ [M. Fetterman, 1996]가 발표되었다. 변조영역이 벌크인 경우보다 양자우물구조를 가질 때 위상변조효율의 향상을 가져왔으며 본 연구의 양자점 구조의 전계광학 변조기의 경우 위상변조효율이 양자우물구조의 변조기보다 3배 이상의 높은 효율을 보였다.

IV. 결 론

세계적으로 아직 보고된 바 없는 InAs 양자점을 변조영역으로 이용한 Mach-Zehnder 전계광학 변조기를 설계 및 제작하였다. InAs 양자점은 5층의 coupled stack 구조로 성장되었으며 상온과 12 K에서 각각 1257 nm, 1158 nm에서 PL 피크를 가지며, BPM과 FDTD를 이용하여 단일모드로 동작하며 입력신호 발생기와 측정 장비와의 임피던스 정합이 되도록 전극을 설계하였다. 변조영역이 InAs 양자점으로 구성된 Mach-Zehnder형태의 양자점 전계광학 변조기의 변조영역은 $1000 \text{ }\mu\text{m}$ 이며 0.5 Hz의 주파수를 가지는 삼각파를 소자에 인가하여 스위칭 전압을 측정하여 위상변조효율을 측정하였다. 위상변조효율은 1550 nm의 입력광에서 TE 편광은 $333.3 \text{ }^\circ/\text{V}\cdot\text{mm}$ 이고 TM 편광은 $300 \text{ }^\circ/\text{V}\cdot\text{mm}$ 로 측정되었다. 기존의 벌크로 변조영역이 구성된 전계광학 변조기와 동일한 소자구조를 가지는 전계광학 변조기에 비해 편광의존도가 낮으며 위상변조효율이 20배 이상 향상된 결과를 얻었으며, 양자우물구조에 비하여는 3배 이상의 높은 위상변조효율을 얻었다.

칩상태의 광변조기를 이용하여 측정하였기 때문에 출력광의 크기가 작게 측정되었지만 향후 패키징을 통해 출력광의 크기를 향상시킬 수 있을 것이다. Mach-Zehnder형태로 소자를 제작하였기 때문에 변조영역의 길이에 비해 소자의 전체 길이가 매우 긴 형태로 제작 되었으나 차후 MMI 구조와 같은 다른 방법으로 광분기영역을 구성하여 소자의 길이를 감소시켜 소형화된 변조기가 구현가능하다.

참고문헌

[1] Y. Arakawa, H. Sakaki, "Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, no. 11, pp. 939-941, 1982.
 [2] H. Sakaki, "Scattering Suppression and High-Mobility Effect of Size-Quantized Electrons in Ultrafine Semiconductor Wire Structures," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 19, no. 12, L735-L738, 1980.
 [3] Z. Alferov, "Double heterostructure lasers: early days and future perspectives," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 6, pp. 832-840, 2000.
 [4] G. Yusa and H. Sakaki, "Trapping of photogenerated

carriers by InAs quantum dots and persistent photoconductivity in novel GaAs/n-AlGaAs field-effect transistor structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 70, no. 3, pp. 345-347, 1997.

[5] A. J. Shields, M. P. O'Sullivan, I. Farrer, D. A. Ritchie, R. A. Hogg, M.L. Leadbeater, C. E. Norman, and M. Pepper, "Detection of single photons using a field-effect transistor gated by a layer of quantum dots," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 25, pp. 3673-3675, 2000.
 [6] S. H. Ok, S. J. Yoon, M. J. Koo, Y. W. Choi, J. Y. Lim, J. H. Kim, S. Lee, D. H. Woo, Y. T. Byun, "Analysis of traveling-wave electroabsorption modulator using FDTD method," in *The 4th Korea-Japan Joint Workshop on Microwave and Millimeter-Wave Photonics*, Daejeon, Korea, pp. 65-68, 2003.
 [7] S. S. Lee, R. V. Ramaswamy, and V. S. Sundaram, "Analysis and design of high-speed high-efficiency GaAs-AlGaAs double-heterostructure waveguide phase modulator," *IEEE J. Quantum Elec.*, vol. 27, no. 3, pp. 726-736, 1991.
 [8] Y. T. Byun, K. H. Park, S. H. Kim, S. S. Choi, J. C. Yi, and T. K. Lim, "Efficient single-mode GaAs/AlGaAs W waveguide phase modulator with a low propagation loss," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 3, pp. 496-501, 1998.
 [9] U. Koren, T. L. Koch, H. Presting, and B. I. Miller, "InGaAs/InP multiple quantum well waveguide phase modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 50, no. 7, pp. 368-370, 1987.
 [10] J. F. Vinchant, J. A. Caviles, M. Erman, P. Jarry, and M. Renaud, "InP/GaInAsP guided-wave phase modulators based on carrier-induced effects: theory and experiment," *IEEE J. Light Wave Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 63-70, 1992.
 [11] H. K. Tsang, J. B. D. Soole, H. P. LeBlanc, R. Bhat, and M. A. Koza, I. H. White, "Efficient InGaAsP/InP multiple quantum well waveguide optical phase modulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, no. 22, pp. 2285-2287, 1990.
 [12] K. Wakita, I. Kotaka, H. Asai, "High-speed InGaAlAs/nAlAs multiple quantum well electrooptic phase modulators with bandwidth in excess of 20 GHz," *IEEE Trans. Photon. Techn. Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. 29-31, 1992.
 [13] R. Spickermann, S. R. Sakamoto, M. G. Peters, and N. Dagli, "aAs/AlGaAs travelling wave electro-optic modulator with an electrical bandwidth > 40 GHz," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 12, pp. 1095-1096, 1996.
 [14] M. Fetterman, C. P. Chao, and S. R. Forrest, "Fabrication and analysis of high-contrast InGaAsP-InP Mach-Zehnder modulators for use at 1.55 μm wavelength," *IEEE Trans. Photon. Techn. Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 69-71, 1996.
 [15] C. Rolland, "InGaAsP-based Mach-Zehnder modulators for high-speed transmission systems," in *Optical Fiber Communication Conference '98, Optical Society of America*, San Jose, USA, pp. 283-284, 1998.

Electrooptic Modulator with InAs Quantum Dots

Seong-Hae Ok, Yon-Tae Moon, and Young-Wan Choi[†]

School of electronics and electrical engineering, Chung-Ang University, Seoul, 156-756, Korea

[†]*E-mail: ychoi@cau.ac.kr*

Chang-Wan Son, Seok Lee, Deok-Ha Woo, Young-Tae Byun, Young-Min Jhon, and Sun-Ho Kim

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 136-791, Korea

Jong Chang Yi

School of electronics and electrical engineering, Hong-Ik University, Seoul, 121-791, Korea

JaeEung Oh

Department electronic, electrical, control and instrumentation engineering, Han-Yang University, Seoul, 133-791, Korea

(Received April 17, 2006, Revised manuscript June 13, 2006)

We have fabricated and measured electrooptic modulator using coupled stack InAs/InGaAs quantum dots. The height of the quantum dot is 16 nm and quantum dots are stacked including an InGaAs capping layer. The peak wavelength of photoluminescence is 1260 nm at room temperature and 1158 nm at 12 K. The operation characteristics of the quantum dots show high modulation efficiency of electrooptic modulator at 1550 nm compared to that of existing III-V bulk and MQW type semiconductor. The measured switching voltage ($V\pi$) is 540 and 600 mV, for TE mode and TM mode, respectively. From the results, the modulation efficiency can be determined as 333.3 and 300 °/V·mm for TE and TM modes. The results reported here may lead to the design and fabrication of a novel electrooptic modulator with low switching voltage and high efficiency.

OCIS Codes : 140.3600.230.3120.