

TE 모드의 위상변화만을 일으키는 P-I-i-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기의 제작 및 변조 특성

김선필[†] · 이상선

한양대학교 전자통신전파공학부 광전자연구실
Ⓣ 133-791 서울특별시 성동구 행당동 17번지

이 석 · 우덕하 · 김선호

한국과학기술연구원 광기술연구센터
Ⓣ 130-650 서울특별시 청량우체국사서함 131호

(2002년 12월 23일 받음, 2003년 3월 11일 수정본 받음)

TM 모드에는 영향을 끼치지 않으면서 TE 모드의 위상만을 변조시키는 P-I-i-I-N GaAs/ Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기를 제작하였다. TE 모드에 대해서만 위상변조를 일으키게 하기 위해 P-I-i-I-N 구조를 선택하였다. Fabry-Perot 공명 방법을 이용해서 TE-와 TM 모드에 대해 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 파장에서 각각 측정하였다. TE-편광된 빛에 대한 위상변조 효율은 $\Delta\phi = 7.9^\circ/\text{V} \cdot \text{mm}$ 였다. 이것은 비슷한 구조를 갖는 위상변조기의 변조 효율 보다 거의 2.5배정도 향상된 결과이다. 또한, TM-편광된 빛에 대해서는 위상변조가 관측되지 않았다.

주제어 : phase modulator, phase shift efficiency.

I. 서론 및 이론적 배경

반도체 소자에 있어서 굴절율의 변화는 중요한 역할을 한다. 굴절율을 변화시키는 다양한 요소들은, 전계에 의한 1차 전기 광학(linear electro-optic: LEO) 효과와 2차 전기광학(quadratic electro-optic: QEO) 효과, 자유 운반자에 의한 밴드갭이 (band-gap shift: BS) 효과와 플라즈마(plasma: PL) 효과 등으로 잘 알려져 있다.^[1,6] 최근에, 앞서 언급된 다양한 굴절율 변화들을 이용한 멀티 기가 헤르츠 동작과 낮은 인가 전압에서 매우 높은 위상변조 효율을 갖는 반도체 도파로 위상변조기들이 보고 되어졌다.^[2,3,6,7] 본 논문에서는, 오로지 TE 모드에 대해서만 선택적으로 위상변화를 주는 P-I-i-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도 파로 위상변조기를 보고한다. TE 모드에 대해서만 위상변조를 일으키게 하기 위해 P-I-i-I-N 구조로 설계 및 제작하였다.^[9] TE-선택적인 위상변화는 편광에 의존적인 LEO 효과를 이용 함으로써 얻어질 수 있다. 동작 파장이 1.55 μm 로 GaAs 밴 드 갭 파장과는 멀리 떨어져 있고, 가해진 전계 영역에서 광 모드의 분포를 억제함으로써 다른 편광-독립적인 효과들을 무시할 수 있다. 본 연구는 집적화된 광 TE-TM 모드 분리기들 편광상태에 민감한 광 시스템에서 매우 중요한 역할을 하는 소 자들의 개선을 위한 데서 그 동기가 되었다. 비대칭 Y-branch, 방향성 결합기, TE-와 TM 모드에 대해 서로 다른 결합길이를 갖는 double-mode waveguide 등을 이용한 다양한 guided-wave TE-TM 모드 분리기들이 보고되어졌다.^[4,5] 그러나,

Mach-Zehnder interferometer (MZI)를 이용한 III-V족 반도체 에서는 아직까지 성공적으로 개발되지 않았다. 그 이유는 효율적인 TE- 또는 TM-선택적인 위상변조를 시키지 못하기 때문으로 생각된다. 따라서, 본 논문에서 보고한 TE-선택적인 P-I-i-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기를 효율적으로 이용할 수 있는 다중모드 간섭기(MMI)를 이용한 새로운 MZI TE-TM 모드 분리를 그림 1에서 제안하고, 곧 제작할 계획이다. 본 논문에서 제작된 위상변조기의 TE-선택적인 위상변 조에 대한 이론적인 내용을 살펴보면, 그림 2에서 보여지듯이 [001] 방향으로 전계를 인가했을 때, 굴절율 변화는 $[\bar{1}10]$ 와 $[110]$ 방향으로 생긴다.^[6] 이 방향은 z와 x 방향과 각각 일치 한다. 따라서, 위상변조기에서 TE 모드는 굴절율 변화를 겪게 된다. 그러나 TM 모드는 전계가 [001] 방향으로 편광되어 있 기 때문에 굴절율 변화를 겪지 못한다. TE- 와 TM 모드의 LEO에 의해 나타난 위상변화량은 다음과 같다.

$$\Delta\phi_{TE} = \frac{\pi n^3 \Gamma \gamma_{41} E}{\lambda}, \quad \Delta\phi_{TM} = 0$$

여기서 γ_{41} 은 선형광전계수이고, E 는 인가된 전계이며, Γ 는 인가된 전계와 광 전계 사이의 중첩적분을 나타낸다.

II. 실험

2.1. 위상변조기의 제작

위상변조기는 전극 부분을 도핑된 반도체 에피박막으로 한 p-i-n 구조를 이용한다. 도핑된 반도체 전극들에 의한 광 흡수

[†]E-mail: toughksp@kist.re.kr

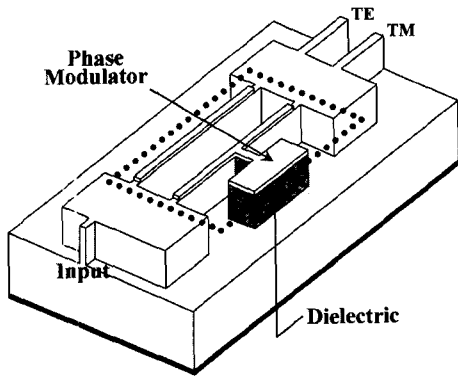


그림 1. 다중모드 간섭기와 위상변조기를 이용한 새로운 MZI TE-TM 모드 분리기.

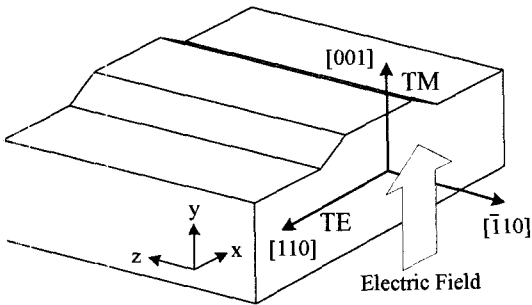


그림 2. [001] 방향으로 전압이 가해졌을 경우의 선형광전효과에 의한 복굴절 효과.

손실을 줄이기 위해 이중접합 구조를 도입하였다.^[7,8] 그림 3은 P-I-I-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기의 에피박막의 특징들과 2차원 단면구조 및 굴절을 분포를 나타내고 있다. 최적의 단일모드 도파로 조건을 찾기 위해서 3-D BPM_CAD를 이용하여 모의 전산 했으며, 그 결과 1.55 μm 파장에서 도파로의 폭은 4 μm였고, 깊이는 1 μm였다. 단일모드 도파로 위상변조기를 제작하기 위한 에피박막 구조는 (100) 방향의 n⁺-GaAs 기판 위에 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition) 기법으로 성장되었다. 에피박막 층들은 0.1 μm n⁺-

GaAs 완충 층, 2 μm n⁺-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 아래쪽 클래딩 층, 0.4 μm i-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 아래쪽 광 구속 층, 0.4 μm i-GaAs 도파로 층, 0.4 μm i-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 위쪽 광 구속 층, 0.6 μm p⁺-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 위쪽 클래딩 층, 그리고 0.2 μm p⁺-GaAs 전극 층(cab layer)을 연속적으로 성장시켜서 이중접합 구조로 만들어졌다. 에피박막 구조의 도핑 농도는 n⁺-GaAs 완충 층이 1 × 10¹⁸ cm⁻³, n⁺-Al_{0.35}Ga_{0.65}As와 p⁺-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 클래딩 층들이 5 × 10¹⁷ cm⁻³이고, 도파로 층과 광 구속 층들은 undoped 층, 또 p⁺-GaAs 전극 층의 도핑 농도는 1 × 10¹⁹ cm⁻³이었다. Si과 C 도펀트들이 n-과 p-type GaAs와 Al_{0.35}Ga_{0.65}As에 각각 사용되었으며, 모든 도핑은 에피박막을 성장할 때 만들어졌다. 이 구조에서는, GaAs 도파로 층과 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 광 구속 층 사이의 굴절을 차가 크기 때문에 광 구속 층은 모드를 도파로 층에 강하게 구속한다. 그 결과 기판으로 누출되는 모드 필드가 작아서 흡수 손실이 작아진다. 얇은 도파로 층은 LEO effect에 의한 위상변조 효율을 최대로 하기 위한 두께로 최적화했다. 또한 n⁺-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 아래쪽 클래딩 층은 n⁺-GaAs 기판으로 광 누출을 막기 위해 두껍게 했다. 4 μm 폭과 1 μm 깊이의 도파로는 포토리소그래피와 습식식각 방법을 이용하여 평판 도파로 웨이퍼 위에 방향으로 제작되었다. 여기서 폭과 깊이는 1.55 μm 파장에서 단일모드 조건을 만족한다. 식각 마스크는 photoresist(AZ 5214-EIR) 패턴으로 만들어졌으며, 습식 식각은 30분 동안 잘 희석된 H₃PO₄:H₂O₂:H₂O(19%:6%:75%) 용액 속에서 이루어졌다. 이 식각용액은 식각면의 거칠기가 아주 작기 때문에 본 연구실에서 저손실 도파로를 제작하는데 사용되어 왔다.^[7] 전극을 만들기 전에 식각된 도파로 구조 위에 polyimide(G-7640E)가 스핀 코팅에 의해 두껍게 도포되었다. Polyimide는 식각된 도파로 구조 위에 전극을 만들 때 평탄화(planarization)와 전극에 의한 parasitic capacitance를 줄이기 위해서 사용되었다. Polyimide는 온도가 400°C까지 조절되는 오븐을 이용하여 질소 분위기로 4단계의 온도에서 경화된 후, 도파로의 전극 층만이 노출 되도록 O₂ plasma asher 장비를 이용하여 산소 플라즈마로 식각되었다. Ohmic contact을 만들기 위해 p⁺-GaAs와 n⁺-GaAs 위에 각각 300Å Ti/150Å Pt/3000

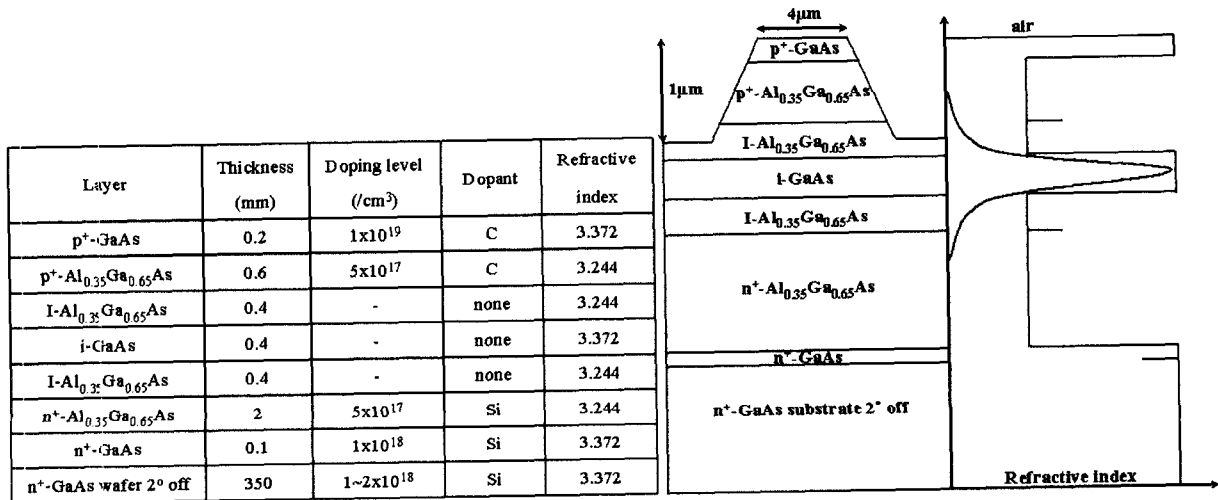


그림 3. P-I-I-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기의 에피박막의 특징들과 2차원 단면구조 및 굴절 분포.

Å Au와 300Å Ti/2000Å Au가 electron-beam 증착기로 증착된 후, RTA(rapid thermal annealing) 장비를 이용하여 410°C에서 30초 동안 열처리되었다. 위상변조기의 양쪽 끝을 절단할 때 거울 면을 쉽게 연기 위해서 p-type 전극을 증착한 다음, n-type 기판의 아래쪽은 C2000 sand paper와 연마장비를 이용하여 약 120 μm 두께로 lapping 된 후, 폴리싱 용액으로 연마되었다. 그 후 n-type 전극을 증착했다. 마지막으로 위상변조기의 길이는 3.1 mm 길이로 cleaving 되고 금도금된 마운트 위에 silver paste로 고정되었다.

2.2. 위상변조 효율 측정

제작된 위상변조기의 위상변조 효율은 광 도파로와 그것의 양쪽 끝 단면들이 Fabry-Perot(FP) 공명기를 형성하므로 FP 공명 방법을 이용하여 측정되었다.^[8] FP 공명기의 간섭무늬들은 역 바이어스 전압을 인가하여 굴절을 변화에 의한 광의 경로를 바꿈으로써 변하게 된다. 그림 4는 위상변조 효율을 측정하기 위한 FP 공명 방법의 측정 장치도를 보여준다. Tunable LD로부터 나온 1.55 μm 파장의 입사광은 편광을 조

절하는 polarization controller를 경유하여 lensed-fiber를 통해서 위상변조기의 절단된 입사면에 coupling 된다. 도파로의 출력광은 ×10배의 대물렌즈로 확대되어 적외선 카메라에 연결된 IR-TV 모니터를 통하여 표시된다. 제작된 도파로 위상변조기가 단일모드만을 전파시키는지를 조사하기 위해 near-field pattern을 측정하였다. 다중모드가 여기된 도파로는 입력광의 위치를 바꾸면 출력된 near-field pattern이 이동하므로 쉽게 확인된다. 그림 5는 제작된 위상변조기의 도파로 모양 및 near-field pattern을 보여주고 단일모드만이 도파되는 것을 알 수 있다. 위상변조는 function generator를 이용하여 위상변조기에 역 바이어스 전압을 인가하면서 변조된 출력광을 광 검출기에 연결된 오실로스코프로 측정하였다. 0 V부터 -8 V까지 변하는 톱니파형 전압이 저주파수로 위상변조기에 인가되었다. 투과광의 세기가 임의의 최대점(최소점)에서 인접한 최대점(최소점)까지 변할 때의 전압차가, π 만큼의 위상변화를 일으키는데 필요한 전압인, Vπ이다. 그림 6은 인가된 톱니파형 전압과 변조된 FP 간섭 무늬를 보여주고 있다. 따라서, Vπ와 도파로 위상변조기 길이를 알면 1 mm 도파로에 1 V의 전압

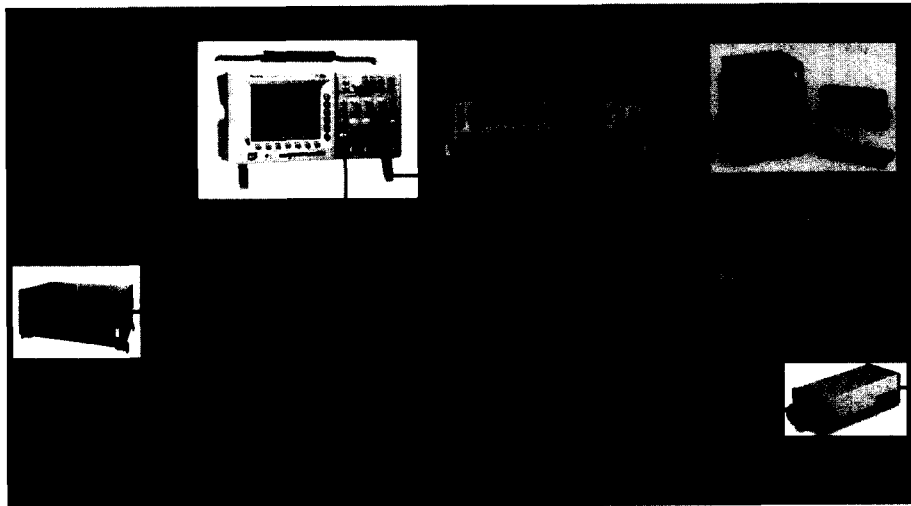


그림 4. 위상변조 효율을 측정하기 위한 Fabry-Perot 공명 실험 장치도.

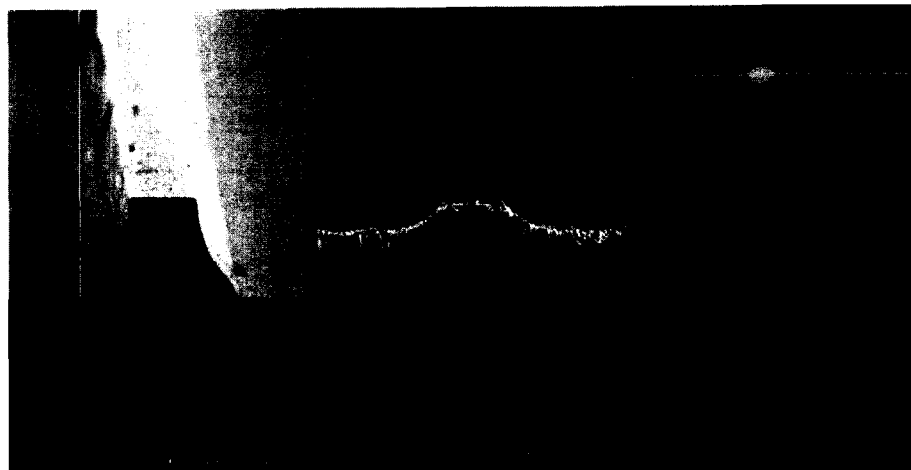
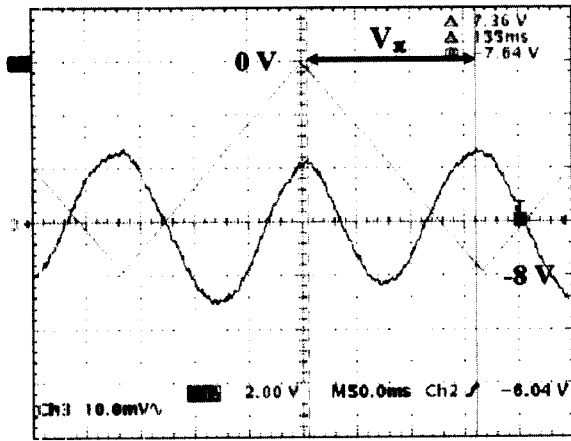
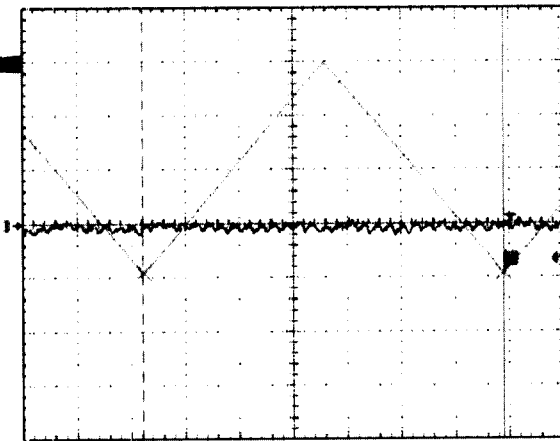


그림 5. 제작된 위상변조기의 SEM 사진과 1.55 μm 파장에서 측정된 near-field pattern.



(a) TE



(b) TM

그림 6. 위상변조기에서 역 바이어스 전압으로 변조된 출력광의 오실로스코프 사진. (a) TE-편광된 빛, (b) TM-편광된 빛.

이 인가될 때의 위상변화로 정의되는 위상변조 효율 $\Delta\phi$ ($^{\circ}$ /V·mm)이 얻어진다. 그림 6(a)는 TE-편광된 빛에 대해서 역 바이어스 전압의 함수로 FP 공명에 의한 투과광 세기의 변화를 보여준다. 측정된 변조기는 그 길이가 3.1 mm이고 $V\pi = 7.36$ V 이므로, 위상변조 효율은 $\Delta\phi = 7.9^{\circ}$ /V·mm이다. 이 효율은 비슷한 구조를 갖는 변조기의 위상변조 효율(2.9° /V·mm) 보다 거의 2.5배정도 향상된 결과이다.^[9] 변조된 출력광은 역 바이어스 전압에 따라 진폭변조가 거의 일어나지 않음을 볼 수 있다. 이것은 전압에 의존하는 광 손실이 작음을 의미한다.^[9] 또한 TM-편광된 빛에 대해서는 위상변조가 일어나지 않아야 하는데, 그림 6(b)의 측정된 결과는 투과광 세기의 변화가 없으므로 위상변조 되지 않았음을 잘 보여준다.

III. 결 론

TE 모드만 선택적으로 위상변조가 가능한 이중접합 P-I-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기가 3-D BPM_CAD 를 이용하여 최적의 단일모드 조건이 계산되어졌고, MOCVD 성장기법과 습식식각 방법으로 제작되었으며, 그 위상변조 효율들이 1.55 μ m 파장에서 TE와 TM 모드에 대해 각각 측정

되었다. Near-field pattern 측정으로부터 단일모드만 여기되는 것이 확인되었으며, 이것은 3-D BPM_CAD를 이용하여 계산된 결과로부터 예측된 것과 같다. 위상변조 효율은 역 바이어스 전압을 인가하면서 FP 공명 방법으로 측정되었으며, 그 결과 TE-편광된 빛에 대해서 $\Delta\phi = 7.9^{\circ}$ /V·mm의 위상변조 효율이 얻어졌다. 이 효율은 비슷한 구조를 갖는 변조기의 위상변조 효율(2.9° /V·mm) 보다 거의 2.5배정도 향상된 결과이다. 또한 TM-편광된 빛에 대해서는 위상변조가 일어나지 않았다. 따라서, 본 연구에서 보고된 P-I-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As 도파로 위상변조기는 그림 1에 보여진 MZI TE-TM 모드 분리기 효율적으로 이용할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] S. S. Lee, R. V. Ramaswamy, and S. Sundaram, "Analysis and design of high-speed high-efficiency GaAs-AlGaAs double-heterostructure waveguide phase modulator," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. Qe-27, pp. 726-736, 1991.
- [2] L. A. Coldren, J. G. Mendoza-Alvarez, and R. H. Yan, "Design of optimized high-speed depletion-edge-translation optical waveguide modulators in III-V semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, pp. 792-794, 1987.
- [3] J. Faist and F. K. Reinhart, "Comparison of phase modulation of GaAs/AlGaAs double heterostructure," *Electron. Lett.*, vol. 23, pp. 1391-1392, 1987.
- [4] P. Wei and W. Wang, "A TE/TM mode splitter on Lithium Niobate using Ti, Ni, and MgO diffusions," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 245-248, 1994.
- [5] K. Okamoto, M. Doi, T. Irita, Y. Nakano, and K. Tada, "Fabrication of TE/TM mode splitter using completely buried GaAs/GaAlAs waveguide," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, pp. 151-155, 1995.
- [6] J. G. Mendoza-Alvarez, L. A. Coldren, A. Alping, R. H. Yan, T. Hausken, K. Lee, and K. Pedrotti, "Analysis of depletion edge translation lightwave modulators," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 6, no. 6, pp. 793-808, 1988.
- [7] Y. T. Byun, K. H. Park, S. H. Kim, S. S. Choi, and T. K. Lim, "Comparison of propagation losses of single-mode GaAs/AlGaAs waveguides in a three- and a five-layer structure loss," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 34, No. 8B, pp. L1051-L1054, 1995.
- [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," *Applied Optics*, vol. 37, no. 3, pp. 99-104, 1998.
- [9] R. J. Deri, E. Kapon, J. P. Harbison, M. Seto, C. P. Yun, and L. T. Florez, "Low-loss GaAs/AlGaAs waveguide phase modulator using a W-shaped index profile," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, no. 19, pp. 1803-1805, 1988.

**Fabrication and Modulation Characteristic of TE-selective P-I-i-I-N
GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As waveguide phase modulator**

Sun-Pil Kim[†] and Sang-Sun Lee

*Photonics Research Laboratory, Division of Electrical and Computer Engineering,
Hanyang University 17 Hangdang-Dong Sungdong-Ku Seoul 133-791, KOREA*

[†]*E-mail: toughksp@kist.re.kr*

Seok Lee, Deok-Ha Woo and Sun-Ho Kim

Photonics Research Center, KIST, P.O.Box 131, Cheongryang, Seoul 130-650, KOREA

(Received December 23, 2002, Revised manuscript March 11, 2003)

We fabricated a P-I-i-I-N GaAs/Al_{0.35}Ga_{0.65}As waveguide phase modulator with significant phase shift for the TE mode but negligible for the TM mode. We selected the P-I-i-I-N structure to cause a phase shift about the TE mode. The wavelength of $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ was measured for both the TE- and TM modes, respectively. As a result, the measured phase shift efficiency ($\Delta\phi$) by using the Fabry-Perot resonance method was $7.9^\circ/\text{V}\cdot\text{mm}$ for TE-polarized light. Also, no modulation was observed for TM-polarized light.

OCIS Code : 250.736.