

자기정렬공정에 의한 GaAs/AlGaAs 광위상변조기의 제작 및 특성 측정

김병성* · 정영철* · 변영태** · 박경현** · 김선호** · 임동건***

*광운대학교 전자통신공학과 신기술연구소

**한국과학기술연구원 정보전자연구부

***고려대학교 물리학과

(1996년 4월 17일 받음)

MOCVD(metal-organic chemical vapour deposition) 방법으로 성장시킨 이중 이종접합구조 GaAs/Al-GaAs 웨이퍼를 이용하여 광위상변조기를 제작하였다. 제작과정에서 도파로와 절연층의 형성시 동일 포토레지스트 패턴을 이용하는 자기정렬공정을 개발하여 그 효율성을 입증하였다. Fabry-Perot 간섭법을 이용하여 변조기의 위상변조효율을 측정하였으며, $1.31 \mu\text{m}$ 파장에서 TE 편광의 경우 $22.5^\circ/\text{Vmm}$ 의 위상변조특성을 얻었다.

I. 서 론

GaAs와 InP 계열의 III-V 화합물반도체를 이용한 광 위상변조기는 광원 또는 검파기와의 집적이 용이할뿐만 아니라 저전압과 짧은 동작 길이에 큰 위상변조 량을 얻을 수가 있다. 그리고 소자의 동작 특성상 전계가 가해지는 영역이 좁으므로 큰 정전장이 발생하여 LEO(linear electro-optic) 효과로 인한 순수 위상 천이가 크게 발생하게 된다. 또한, 광위상변조기는 코히어런트통신 시스템에 사용하여 수신단의 동작뿐만 아니라 전체적인 시스템 동작의 향상을 기대할 수 있다. 그리고 Mach-Zehnder 간섭계 또는 directional coupler 등에서 일부분을 담당하여 광결합기 또는 광스위치로도 사용할 수 있다.^[1]

본 논문에서는 GaAs/AlGaAs 화합물 반도체를 MO-CVD(metal-organic chemical vapour deposition) 방법으로 이중이종접합의 구조가 되도록 성장을 한 웨이퍼에 반도체공정기술과 습식식각을 이용하여 단일모드 도파로를 제작하고 e-beam 진공증착기와 열확산로를 이용하여 전극을 완성하므로써 소자를 제작하였다. 제작에 사용된 마스크는 레이저 감광을 이용하여 직접 제작하여 사용하였으며, 절연층의 형성에는 자기정렬마스크 방법을 사용하였다. Fabry-Perot 간섭법을 이용하여 위상변조기의 위상천이효율을 측정하였다.

2장에서는 광위상변조기의 변조에 관한 기본이론을 다루고 있으며, 3장은 소자의 제작과정과 결과를 기술하고 있다. 4장에서는 제작된 소자의 위상천이효율의

동작 특성을 측정하는 측정시스템의 구현과 그 결과에 관하여 논의하였다. 5장에서 결론을 맺었다.

II. 위상변조의 기본이론

광위상 변조기는 그림 1에서 보는 바와 같이 입사된 광의 위상을 인가된 전압에 의하여 변조를 하는 전광 소자이다. 코히어런트 시스템에서의 위상변조는 실제 구현된 시스템 상에서 수신 감도를 향상하여 광섬유 시스템의 채널 밀도를 증가시킨다.^[2] 그러나 위상변조기의 구조가 레이저다이오드의 이득영역과 같은 물질로 구성되어 많은 손실이 발생할 수도 있으나 IID(impurity induced disordering), 재성장, 또는 선택영역성장(selective area growth)을 하여 작게 할 수 있다.^[3]

n^+ -GaAs 기판 위에 MOCVD로 GaAs/AlGaAs 이중이종접합 구조의 박막을 성장시킨 웨이퍼로 변조기를 제작하였다. 박막의 구성은 그림 2 에서와 같이 도핑농도가 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이상이 되는 기판 위에 두께 $3.5 \mu\text{m}$ 의 $\text{N-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$, 두께 $0.125 \mu\text{m}$ 의 $n\text{-GaAs}$, 두께 $0.125 \mu\text{m}$ 의 $p\text{-GaAs}$, 그리고 두께 $1.5 \mu\text{m}$ 의 $\text{P-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 를 차례로 성장하고 두께 $0.2 \mu\text{m}$ 의 $p^+\text{-GaAs}$ 를 덮개층으로 하여 전극 형성을 용이하도록 하였다. $\text{N-}, \text{P-Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ 는 도핑농도가 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 가 되도록 도핑하였으며, $n-, p\text{-GaAs}$ 는 도핑을 $5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 의 농도가 되도록 하였다. 그리고 덮개층은 도핑농도가 $2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 이상이 되도록 도핑하였다. n 형층의 도너로는 Si를 불순물로 사용하

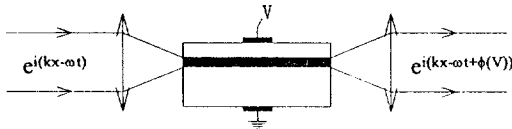


그림 1. 입사광과 광위상변조기. 레이저빔은 GaAs/Al-GaAs 이종이종접합 구조로 이루어진 변조기에 입사된다. 도파로 내에 형성되는 pn 접합에서 전기장 세기와 자유반송자 농도가 변화하도록 하게 하여 도파로 내의 국부적인 유효굴절을 변화가 발생하도록 하게 하고, 이에 따라 외부인가전압 V의 함수로 출력광의 위상이 변하도록 한다.

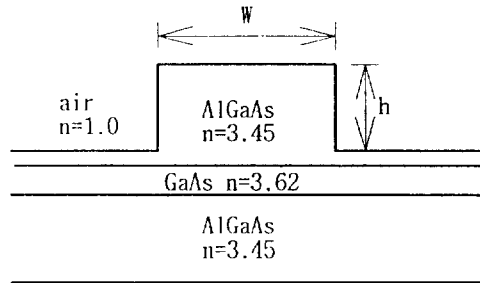
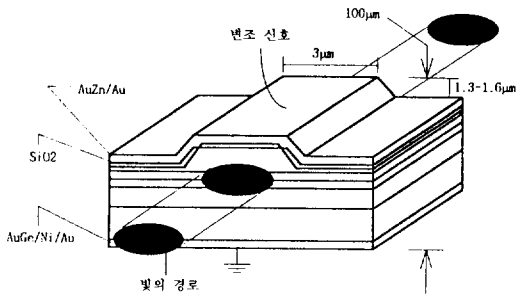


그림 3. 단일모드 도파로를 위한 도파로의 광학적인 구성. 여기에서 도파로는 strip-loaded 형태로 상클래드의 두께차를 1.4 μm 로 하였을 때, 두께차에 의해 발생하는 코어와 클래드의 수평유효굴절률차는 0.0013이 되어 단일모드 도파로를 위한 도파로의 선폭은 6 μm 이하가 되어야 한다. W는 도파로 선폭이고 h는 식각깊이를 나타낸다.



(a)

Layer의 성분	도핑농도	두께
p+ - GaAs	$\geq 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	0.2 μm
P - Al _{0.4} Ga _{0.6} As	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	1.5 μm
p - GaAs	$5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	0.125 μm
n - GaAs	$5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	0.125 μm
N - Al _{0.4} Ga _{0.6} As	$2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$	3.5 μm
n+ - GaAs (100)	$\geq 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	substrate

(b)

그림 2. (a) 제작된 위상변조기의 개략도. 입사된 광은 pn-GaAs 층을 따라 도파하며 전파방향은 [110] 방향이다. 수평광구속을 위해 strip-loaded 형태로 제작하였다. (b) 위상변조기 박막의 구조. MOCVD 방법으로 GaAs/AlGaAs 이종이종접합 구조의 박막을 성장하였다. 코어는 pn-GaAs이고 클래드는 Al이 0.4인 PN-AlGaAs이다. 고농도의 p⁺-GaAs층은 전극 형성을 용이하도록 하게 한다. p, n-층의 도핑에는 각각 C, Si을 사용하였다.

였고 p 형층은 C를 도핑하였다.

이러한 구조에 반도체공정기술을 이용하여 단일모드 도파로를 형성한 후 외부전압을 인가할 수 있도록 전극을

완성하여 소자를 제작하였다. 그림 2는 위상변조기와 사용된 박막의 구조이다. 광학적으로 pn-GaAs층은 코어이고 PN-Al_{0.4}Ga_{0.6}As는 클래드로 동작하게 되어 입사된 빛을 수직적으로 구속하게 된다. 수평구속을 하기 위해서는 상클래드의 두께차를 다르게 하여 수평적으로 유효굴절을 차가 발생하도록 하게 한다.^[4]

소자의 변조효과는 코어영역내의 공핍층에서 일어나게 된다. pn 접합을 하면 양쪽의 접합면에서는 공핍층이 형성되는데, 도핑정도의 농도에 따라 공간상의 공핍층 폭과 내부전계의 크기가 다르게 된다. 그리고 외부역바이어스 전계에 따라 공핍층의 가장자리가 천이하고 이에 따라 도파로 내의 흡수와 굴절률이 변하게 된다. 이러한 변화는 그림 2의 박막구조를 기준으로 했을 때(이하 수직, 수평은 그림 2를 기준으로 한다) 수직공간적으로 분포하며 도파비파의 중첩영역에서 도파해 가는 빛의 위상과 크기에 영향을 주게 되고, 이로부터 위상변조효과를 얻을 수 있다.^[1,5,6] 즉, 역바이어스 전압이 변조펄스가 되고, 광파가 반송파 신호가 되는 것이다.

도파로의 단일모드 동작 조건을 알기 위하여 유효굴절률법(EIM : effective index method)를 이용하였다.^[4] 소자의 수직광구속은 박막의 구조와 성분에 의하여 결정되어지나 수평광구속은 상클래드영역(P-Al_{0.4}Ga_{0.6}As)의 두께차에 의한 유효굴절률차로 인하여 발생한다. 본 논문의 도파로의 형태는 그림 3에서와 같이 strip-loaded 형태로 클래드의 식각을 코어영역의 전까지 한 것이다. 도파로의 유효굴절률차에 의한 도파모드 수는 도파로의 폭(W)과 각 영역의 유효굴절률에 의해 결정된다. 여기에서 각 영역의 유효굴절률은 식각깊이(h)에 의해 결정되어지는 양이다. 따라서 단일모드의 도파를 위해서는

도파로의 폭과 식각깊이를 적절하게 선택하여야 한다. 계산에서는 도파로의 식각 형태는 수직하다고 가정하였다.

계산에서 식각깊이를 $1.4 \mu\text{m}$ 로 하였을 때 수평유효 굴절율차는 0.0013 이 되었으므로 단일모드가 되기 위해서는 도파로폭은 $6 \mu\text{m}$ 이하가 되어야 했다. 실제 제작에서는 유전층과 금속층이 있게 되나 SiO_2 의 굴절율은 $1.3 \mu\text{m}$ 파장에서 1.447 이므로 이러한 차이는 결과에 큰 영향을 미치지 않는다. 제작에서는 직선도파로의 패턴이 있는 마스크를 레이저리소그라파를 이용하여 제작 사용하였으며, 이때 도파로패턴은 $3 \mu\text{m}$ 에서 $5 \mu\text{m}$ 사이의 10가지 서로 다른 선폭변화가 있도록 하였다. 식각은 습식식각 방법으로 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 의 깊이가 되도록 하였다.

반도체 pn 접합에서는 p-와 n-형 반도체의 페르미 준위가 일치할 때까지 접합경계로부터 자유반송자가 제거되어 공핍층을 형성한다. 자유반송자의 제거에 따라 발생하는 공간전하는 공핍영역 내에서 내부전계를 발생시킨다. 이러한 과정의 직접적인 결과로 공핍영역에서의 굴절율은 중성영역의 것으로부터 변화하게 된다. 공핍영역에서의 굴절율 변화원인으로는 크게 외부전압에 의하여 직접적으로 발생하는 전기장효과와 외부전압에 따라 간접적으로 발생하는 자유반송자의 증감에 의한 반송자효과로 구분할 수 있다. 전기장 효과에는 LEO(linear electro-optic), ER(electrorefractive) 효과가 있고 반송자 효과에는 플라즈마(plasma), 밴드갭천이(bandgap-shift) 효과가 있다.^[1,5,6,7] 역바이어스 전압이 가해짐에 따라 공핍층이 외부전압이 가해지지 않을 때의 초기평형위치로부터 주위의 클래드층으로 넓어지면서 자유반송자의 감소와 높은 전기장을 유발하게 되고 이에 따라 공핍영역의 빛흡수도와 굴절율은 변하게 된다. 여기에서 흡수도의 변화에 의한 굴절율의 변화는 Kramers-Kronig 공식을 따른다.^[8] 도파로를 따라 전파하는 광모드의 강도와 위상은 이러한 영향을 받게 되고, 위상 변조기는 강도에 대한 영향은 최소화 하면서 위상 변조는 최대한 하여야 한다. 결국 전기적인 효과에 의한 공핍층의 천이로부터 발생하는 광위상은 천이하게 되고, 그 양은 공핍층의 분포영역, 공핍층 내의 전기장 세기, 그리고 도파 모드의 공핍층과의 중첩 정도에 따라 결정되게 된다.

공핍층의 두께와 각 영역에서의 전기장 세기는 각 층의 공핍영역에서 포아송 방정식을 전압과 전속밀도가 일정하다는 경계조건을 이용하여 구할 수 있고,^[9] 공핍층의 두께는 pn-접합의 성질, 도핑정도, 외부역바이어스전압의 함수가 된다. 그림 4는 공핍층 내에서의 전기장 분포를 나타내는 것으로, 실선은 인가전압이 가해지지 않을 때

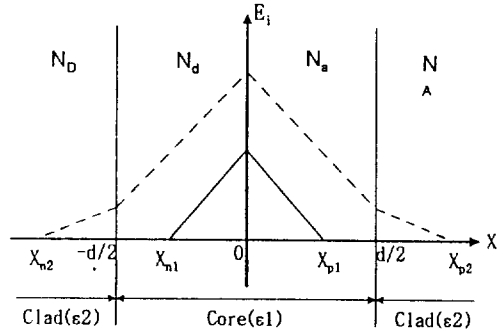


그림 4. 도파로 내에서 형성되는 공핍층의 폭 변화. 인가전압, $V_a=0$ 일 경우에는 pn-GaAs층 내부에만 형성되고 V_a 가 점점 증가해 감에 따라 공핍층이 넓어지고 크기도 증가한다. 높은 인가전압에서는 PN-AlGaAs로 침투하여 코어와 클래드 전반에 걸쳐 분포하게 된다. 여기에서 E_i 는 내부 전기장이다.

또는 인가전압이 가해져서 공핍층 내에서만 내부전기장이 형성될 때를 나타낸 것이다. 그리고 점선은 큰 인가전압으로 인하여 공핍층의 클래드영역으로 확장된 형태를 보여주고 있다. 그림의 두 경우에 대한 공핍층의 두께는

$$x_{n1} = x_{p1} = \frac{\sqrt{\epsilon_1(V_D - V_a)}}{qN} \quad (1)$$

$$x_{n2} = \frac{d}{2} + \frac{qN_d d}{\epsilon_1} + \sqrt{\left[\frac{qN_d d}{\epsilon_1} \right]^2 - \frac{qN_d d}{\epsilon_2} \left[1 + \frac{N_D}{N_A} \right] \left[\frac{qN_d d^2}{4\epsilon_1 - V_D + V_a} \right]} \frac{qN_D}{\epsilon \epsilon_2} \left[1 + \frac{N_D}{N_A} \right] \quad (2.1)$$

$$x_p = \frac{d}{2} + \frac{N_D}{N_A} \left[x_n - \frac{d}{2} \right] \quad (2.2)$$

으로 표현될 수 있다. 식 (1), (2)과 그림 4에서 $x_{n1,2}$, $x_{p1,2}$ 는 각각 공핍층의 두께이다. N_a , N_d 는 코어의 p-, n-층의 도핑농도이며, N_A , N_D 는 클래드의 P-, N-층의 농도이다. ϵ_1 , ϵ_2 는 각각 코어와 클래드의 유전율이다. d 는 코어의 두께이고 q 는 전자의 전하량이다. E_i 는 소자의 수직방향으로 놓여있는 전기장을 나타내고 V_D 와 V_a 는 각각 공핍층 내의 Built-in Voltage와 외부인가전압을 나타낸다. 공핍층에 걸리게 되는 전기장은 소자의 수직방향으로 분포하게 되므로 전파모드는 1차원 해를 고려하여 구할 수 있다. 소자는 전극과 기관으로 인한 광전력손실을

작게하기 위해 클래드를 두겹게 하고, 기본모드 만을 도파하도록 하기 위해 도파로코어의 두께는 얇도록 한다. 도파로는 광학적으로 3층 평판도파로로 모델링할 수 있으며, 도파로의 수직모드의 형태는 클래드에서의 AI 함유율, 코어의 두께, 그리고 도파하는 파장에 따라 다르다.

유효굴절율은 공핍층에 증착한 도파모드와 공간적으로 분포된 굴절을 변화의 곱의 평균으로 정의할 수 있다. 역바이어스 전압에 의한 굴절을 변화는 매우 작고 주로 도파영역에서만 일어나게 된다. 외부인가전압이 없을 때에도 초기 공핍층이 있게 되므로 유효굴절율의 변화는 인가전압 V_0 일 때의 변화와 $V_0=0$ 일 때의 변화와의 차가 된다. 도파로를 따라 전파해가는 도파모드는 공핍층내에서 굴절율의 변화의 영향을 받아 위상 천이를 하게 된다. 위상 천이량은

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta n_{eff} \frac{L}{\lambda} \quad (3)$$

과 같이 유효굴절율의 변화량에 비례하여 나타나게 된다. 여기서 λ 는 전파모드의 파장이고 L 은 도파로의 길이이다. 단위인가 전압과 단위도파로 길이에 대한 변조기의 효율을 구하기 위해 식 (3)으로부터

$$\Delta\phi_N = \frac{\Delta\phi}{V_0 L} = \frac{2\pi\Delta n_{eff}}{V_0 \lambda} \quad (4)$$

을 구하여 위상천이효율을 산정할 수 있다. 위상변조기는 이상적으로 외부전압의 인가에 따라 흡수의 변화는 작아야 하며 작은 단위인가 전압과 단위도파로 길이에 대해 π 의 위상천이를 하여야 한다.

III. 위상변조기의 제작과정과 결과

n^+ -GaAs 기판 위에 (001) 방향으로 박막을 성장시킨 웨이퍼에 [110] 방향으로 도파로를 제작하고 전극을 형성하여 완성하였다.^[9,10] 패턴의 이미징 과정에서 사용되는 마스크는 레이저 감광과 e-beam 증착기를 사용하여 직선도파로가 있는 Cr-마스크를 제작하여 사용하였다. 마스크상에 있는 직선도파로는 3~5 μm 의 선폭변화가 있도록 하였다. 전극형성에 자기정렬마스크 방법을 사용하였는데 이는 도파로 패턴을 형성하기 위해 만들어진 포토레지스트를 이용하여 도파로를 제작하고 절연층을 형성한 후 lift-off를 하는 방법이다. 보통 절연층과 금속을 형성하기 위해서는 도포된 포토레지스트를 역상패턴이 되도록 하고, 그 위에 금속을 성장하여 lift-off를 하는 방법과 절연물질을 성장하고, 원하지 않는 부분을 식각해

낸후 금속을 성장하는 방법이 있다. 두 방법은 모노클로로벤젠 용액을 사용하거나, 절연물질을 제거하는 절차가 있다는 번거로움이 있다. 본 논문에서 사용한 자기정렬공정은 절연층을 형성하고 금속을 증착하는 공정을 단순화시켰다.

시료세척을 하고 포토레지스트 AZ-1350J 또는 AZ-1450J를 회전속도 5000 rpm으로 하여 40초 동안 도포를 하였다. 오븐으로 포토레지스트가 도포된 시료를 85°C에서 25분간 구운 후, 패턴마스크와 시료를 적절히 정렬하여 UV(ultra-violet) 램프로 120초간 노출하여 포토레지스트를 감광시켰다. 시료 위에 도포된 포토레지스트의 용기된 네 가장자리를 제거하여 패턴마스크와 시료와의 접촉을 좋게 하고 패턴의 경계면이 선명한 도파로 패턴을 얻을 수 있었다. AZ-351 현상액과 증류수를 1:2로 혼합하여 40~50초 동안 현상하였다. 현상액의 농도, 온도, 그리고 현상 시간에 의해 도파로 패턴 이미지가 크게 좌우된다. 시료를 증류수로 잘 세척한후 질소 가스로 불어 건조시킨다. 오븐으로 90°C에서 15분간 구워 습식식각에 적절하게 포토레지스트를 경화시키고, 시료 위에 형성된 산화막을 제거하기 위해 염산을 증류수와 1:10의 비로 혼합한 수용액에 30~60초간 담근 후 질소 가스로 시료상의 염산 수용액을 불어낸다.

인산(H_3PO_4) : 과산화수소(H_2O_2) : 증류수(H_2O)를 19 : 6 : 75의 비로 혼합한 인산수용액으로 GaAs의 덮개층과 AlGaAs의 상클래드층을 식각하였다. 식각 시간은 100~150초 동안 하였으며 식각률은 $y=0.72x+0.11$ 이다.^[11,12] 여기서 $y[\mu\text{m}]$ 는 식각 깊이이며 $x[\text{분}]$ 는 식각시간이다. 식각 후 증류수로 잘 세척하여 인산수용액을 시료로부터 제거하였다. 식각을 하는동안 시료나 수용액에 요동을 주게 되면 고르게 식각되지 않는다. 식각 후의 포토레지스트는 초가집 지붕의 모양이고 도파로는 [110] 방향의 단면에서 보았을 때 under-cut 형태로 되게 된다. 이러한 도파로와 포토레지스트의 형태를 이용하여 절연층과 전극을 제작하였다.^[9,10] 패턴 포토레지스트가 도포된 상태에서 e-beam 증착기로 SiO_2 를 2500 Å의 두께로 증착하였다. 아세톤으로 lift-off를 하여 도파로 위의 포토레지스트를 제거하였다. 그리고 p형 금속으로 Au : Zn/Au를 e-beam 증착기를 이용하여 1000/3000 Å의 두께로 증착하였다.

5 μm 입자의 알루미늄 분말을 이용하여 시료의 두께가 100 μm 의 두께가 될 때까지 시료의 뒷면을 갈아냈다. 갈아내기 과정 동안의 시료의 고정은 다음과 같이 하였다. Hot-plate 로 지그를 달구며 그 위에 왁스를 녹인 후 도파로가 있는 시료의 p층을 밑으로 하여 붙인다.

그리고 지그를 서서히 식히며 왁스를 굳게 한다. 이 과정에서 시료 밑의 왁스에 거품과 찌꺼기가 생기지 않도록 주의해야 한다. 시료의 뒷면을 polishing을 하게 되면 시료의 절단에서 좋은 단면을 얻기가 용이해진다. 지그로부터 시료를 떼어내기 위해서는 TCE 또는 아세톤과 함께 끓여 시료 밑의 왁스를 제거한다. 격렬하게 끓을 경우 거품이 시료를 깨뜨릴 수 있어 이를 방지하기 위해 필터페이퍼를 비이커 바닥에 깔아 놓은 후 그 위에 시료가 붙어 있는 지그를 놓는다.

n형 금속으로 Au:Ge/Ni/Au를 2000/100/3000 Å의 두께로 e-beam 증착기를 사용하여 증착하였다. 질소 환경에서 내부 온도가 430°C인 열확산로에 150~180초 동안 넣어 전극을 완성하였다. 끝으로 좋은 단면 상태가 되도록 칼 또는 스크라이버를 이용하여 절단하였다.

시료의 n형 전극을 Au 코팅한 마운트 위에 실버페이스트로 붙여 접지 고정하였다. 이때 페이스트가 도파로 단면을 가리지 않도록 주의한다. 시료의 p형 전극 위에는 실버페이스트를 사용하여 본딩을 하였으며 본딩된 와이어는 외부 충격으로부터 보호하기 위해 베이스 블록에 절연 에폭시를 사용하여 고정하였다.

그림 5는 전극 형성과정에서 자기정렬마스크 lift-off 방법을 사용하여 제작한 소자의 SEM(scanning electron microscope) 사진으로 배율은 실물의 $\times 10^4$ 이다. 이때 사용된 포토레지스트는 AZ-1350J 였으며 인산수용액으로 1.6 μm 깊이가 되도록 습식식각을 하였다. 도파로의 윗 부분의 폭은 1 μm이고 아랫 부분은 3.5 μm이다. SiO₂는 3000 Å이 증착되어 있고 금속은 Au:Zn와 Au로 각각



그림 5. 제작된 소자의 SEM 사진. 도파로의 코어 부분과 경사진 부분을 제외한 전면에 SiO₂가 증착되어 있고, 그 위에 금속이 성장되어 있다. 코어의 수평폭은 평균 2.2 μm이고 코어의 수직폭은 0.3 μm이다.

1000 Å의 두께로 성장되어 있다. 도파로 코어의 폭은 0.3 μm이고, SEM 사진을 찍기 위하여 클로록스(NaOCl) 5%로 5초 동안 스테인 식각을 하였다.

IV. 측정 결과

변조기의 도파 상태와 위상천이효율을 측정하기 위해 Fabry-Perot 간섭법을 이용한 측정시스템을 구현하였다.^[9] 단일모드 도파특성을 갖는 변조기의 측정에는 Fabry-Perot 간섭측정이 유리하며 다중모드 도파에는 Mach-Zehnder 간섭측정을 이용하여야 한다. Fabry-Perot 간섭측정은 도파로 단면 자체의 내부 반사를 이용하는 것으로 단면 무반사코팅을 하지 않고 측정할 수 있다는 장점이 있다. Mach-Zehnder 간섭 측정에서는 위상변조기가 있는 암(arm) 외에 위상의 기준이 되는 기준암이 있어야 하며 소자의 단면을 무반사 코팅을 해야 한다는 것과 광원의 전력이 충분히 커야 한다는 단점이 있다. 그러나 Fabry-Perot 간섭측정은 소자 자체의 단면 반사를 이용하는 것으로 출력의 근방 영역에서 출력광을 광검출기로 검파하여 전압에 따른 광응답을 측정하는 것이다. 그림 6에 Fabry-Perot 공진기에서의 입사파, 반사파, 그리고 내부파가 정의되어 있다.

도파로 내의 유효굴절율이 변함에 따라 Fabry-Perot 공진기의 optical length가 변하게 된다. 그리고 단면을 무반사 코팅을 하지 않으므로 optical length의 변화에 의해 공진기의 투과량이 변하게 되므로 이를 측정하여 위상천이를 산출하게 된다. 공진기의 투과도는

$$T = \frac{|a_2|^2}{|a_1|^2} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha L}}{(1-r)^2 + 4r \sin^2 \phi} \quad (5)$$

과 같이 도파로 내의 흡수와 굴절율(즉, 위상 천이)의 함수로 나타낼 수 있다.^[4] 여기서, T는 입사전력과 투과전력의 비인 투과도이며 L은 도파로의 길이이다. α와 φ는 공진기 내의 경로 하나에 대한 전력손실과 위상천

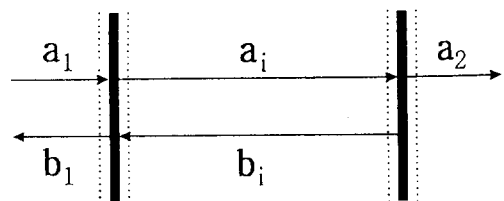


그림 6. Fabry-Perot 공진기. 입사파(a₁), 반사파(b₁), 공진기 내부의 파(a_i, b_i), 투과파(a₂)가 정의되어 있다.

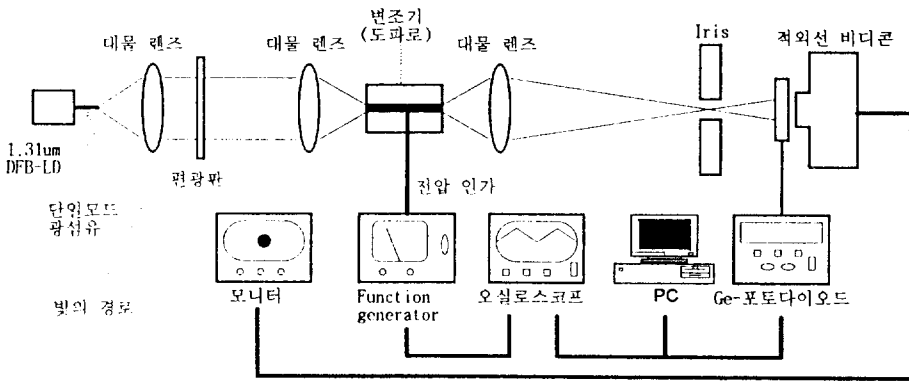


그림 7. Fabry-Perot 간섭법을 이용한 측정장치의 개략도.

이량을 나타낸다. $r = Re^{-\alpha}$ 로 R 은 도파로 단면의 전력 반사율이다. 외부전압의 인가에 따라 위상천이량 ϕ 와 손실 α 가 변하게 되므로 T 는 전압의 함수로 되는 것이다. 전압의 변화에 따른 T 의 변화의 측정에서 최소치(최대치)와 그 다음 최소치(최대치)간의 전압차는 π 만큼의 위상천이를 하는데 필요한 양으로 이로부터 단위소자길이당 위상천이효율[°/Vmm]을 산출하게 된다.

측정장치는 그림 7과 같이 구성하였다. 출력세기가 1 mW이고 동작파장이 1.31 μm 인 DFB-LD를 광원으로 사용하였다. 단일모드 광섬유로 pig-tailing 결합을 하였고 광섬유로부터의 출력은 0.5 mW였다. 결합된 빛은 편광판을 이용하여 TE 모드만을 여과하였다. NA 0.45인 대물렌즈를 이용하여 도파로의 단면 코어영역에 초점을 맞추었고 도파로의 출력광은 대물렌즈를 통하여 IR-vidicon(HAMAMATSU C1000)에 결상시키거나 광검출기에 접속하게 하였다. 최적의 단일모드 도파로를 확인하기 위해 XYZ 변환기로 초점의 위치를 변화시키며 모니터링을 하였다. 이때에는 출력광은 IR-vidicon으로 모으게 되며 모니터로 모드상태를 관찰하였다. 좋은 도파특성의 단일모드가 되었을 때 출력광을 Ge-포토다이오드로 접속하여 오실로스코프와 컴퓨터로 인가 전압에 따른 출력광 응답을 조사하였다. 전압원과 검파기는 오실로스코프에 함께 연결하여 각 변화를 동시에 검출할 수 있도록 하였다.

그림 8은 완성된 변조기의 단일모드 도파특성을 조사한 결과의 플라로이드 사진이다. 변조기의 도파로는 4 mm로 절단하였고 식각깊이는 1.35 μm 가 되도록 하였다. 도파로 윗부분의 폭은 2.1 μm 였고 아래의 폭은 4.6 μm 였다. 사진에서 아래 부분의 곡선은 도파모드의 수평분포이고 사진 가운데의 하얀 점이 도파된 빛의 근방영역 분포로 공간필터의 도움 없이 좋은 단일모드

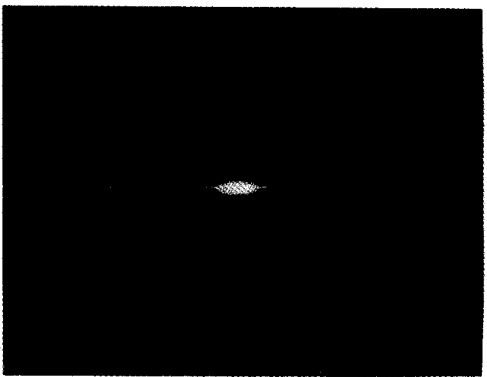


그림 8. 변조기의 단일모드 도파 특성을 보이는 플라로이드 사진. 도파로의 길이는 4 mm이고, 식각 깊이는 1.35 μm 이다. 그리고 코어의 수평폭은 평균 3.3 μm 이다.

특성을 보였다. Fabry-Perot 간섭법을 이용하여 광변조 특성을 관측하기 위해서는 될 수 있으면 단일도파가 되도록 하여야 하며, 그렇지 않은 다중모드도파인 경우에는 기본모드가 가장 크게 도파가 되도록 하여야 한다.

그림 9는 Fabry-Perot 간섭법을 이용하여 측정된 인가전압에 따른 출력응답을 보이고 있다. 인가전압은 0 ~ 10V의 범위로 4~5 Hz의 주파수를 사용하였다. 그림 9(a)는 삼각파전압을 인가하였을 때 도파로에서 간섭된 빛의 출력으로 좌우대칭으로 정현적으로 변하고 있음을 볼 수 있다. 상단의 삼각파는 신호발생기로부터의 입력이고 하단이 변조기의 광출력응답이다. 그림에서 보이고 있는 변조기의 π 의 위상천이를 위한 전압차인 V_{π} 는 2.0 V로 위상천이효율은 22.5°/Vmm가 된다. 그림 9(b)는 톱니파를 가했을 때의 응답이다. 출력된 빛의 세기가 전압의 세기에 따라 정현적으로 잘 변하고 있고 V_{π} 는

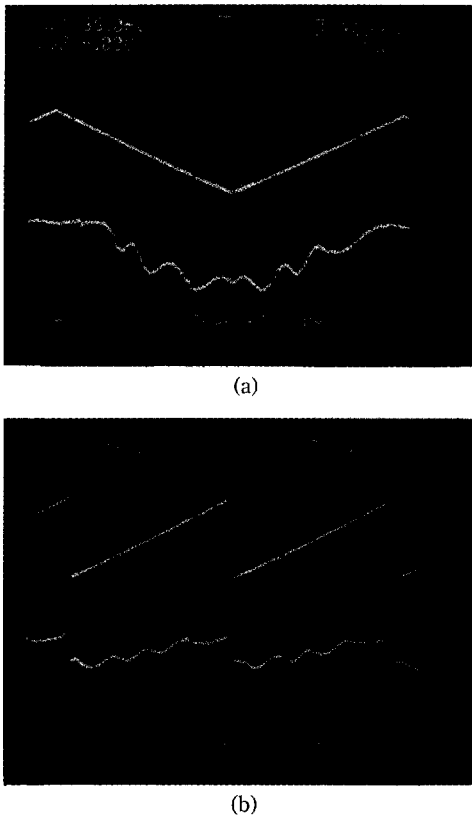


그림 9. 변조기의 인가전압에 따른 출력응답. V_m 는 평균 2.0 V로 22.5°/Vmm의 위상천이효율을 보였다. 인가전압은 4~5 Hz로 0~10 V의 범위이다. (a) 삼각파 전압 인가. (b) 톱니파 전압 인가.

2.2 V로 위상천이효율은 20.5°/Vmm였다. 위의 데이터는 하나의 시료를 한 번 측정된 값으로 삼각파와 톱니파의 차이는 인가파형에 따른 변화라기보다는 실험적인 측정 오차에 기인하는 것으로 판단된다. V_m 는 평균적으로 2.0 V로 위상천이효율은 22.5°/Vmm가 되었다.

전압의 변화에 따라 출력광의 세기가 전체적으로 변하고 있는 것은 외부인가전압의 증가에 따라 2차 전기장 효과인 ER 효과가 커져 내부손실이 증가하기 때문이다. 즉, 외부전압이 커짐에 따라 전도대와 가전대의 경사가 커지게 되고, 이에 따라 전자-정공쌍 생성의 확률이 커져 입사된 빛의 흡수가 증가하기 때문이다.

변조기를 고속동작시키기 위해서는 소자의 저항과 기생전용량을 작게 하여야 하므로 이를 위해서는 도파로의 코어층을 식각해 내는 것이 필요하다. 이때 도파로의 수평구속에서 코어와 클래드의 굴절률 차가 커져 다중모드가 되기 쉽다. 따라서 단일모드가 되기 위해서는

도파로의 선폭이 작아져야 한다.

V. 결 론

MOCVD 방법으로 성장된 이중이종접합 구조의 GaAs/AlGaAs 웨이퍼로 단일모드 도파로를 제작하고 전극을 완성함으로써 광위상변조기를 제작하였다. 마스크는 선폭의 변화가 있는 직선도파로 Cr-마스크를 제작하여 사용하였다. 절연층의 형성에는 패턴이미징을 위해 사용한 포토레지스트를 마스크로 사용하여 절연층을 만드는 자기정렬마스크 lift-off 방법을 이용하였다. 하나의 시료위에 있는 도파로는 3~5 μm 의 10가지 서로 다른 선폭변화가 있도록 하였으며, 인산수용액으로 1.3~1.6 μm 의 깊이가 되도록 습식식각을 하여 단일모드 도파로를 제작하였다. 전극의 형성에 사용한 금속은 p-형 금속에는 Au : Zn, Au를 사용하였고, n-형 금속은 Au : Ge, Ni, Au로 증착하였다. 전극의 완성을 위한 열처리에는 N_2 환경의 열확산로를 사용하였다.

Fabry-Perot 간섭 측정시스템을 구성하여 위상천이효율[°/Vmm]을 측정하였다. 광원은 동작파장이 1.31 μm 인 DFB-LD를 단일모드 광섬유로 pig-tailing 결합을 하여 사용하였다. V_m 는 4 mm의 도파로 길이에서 평균적으로 2.0 V로 위상천이효율은 22.5°/Vmm임을 알 수 있었다. 전압의 세기가 커질수록 출력의 세기가 전체적으로 작아지는 것은 ER 효과에 의한 것으로 추정된다.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Mendoza-Alvarez et al., "Analysis of depletion edge translation lightwave modulators", *J. Lightwave Technol.*, vol. 6, no. 6, pp. 793-808, 1988.
- [2] L. A. Coldren and S. W. Corzine, "Continuously-tunable single-frequency semiconductor lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp. 903-908, 1987.
- [3] M. Aoki et al., "InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated with a DFB laser fabricated by band-gap energy control selective area MOCVD", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2088-2096, 1993.
- [4] H. A. Haus, *Waves and Fields in Optoelectronics*, Prentice-Hall, 1984.
- [5] S. S. Lee, R. V. Ramaswamy, and V. S. Sundaram, "Analysis and design of high-speed high-efficiency GaAs-AlGaAs double-heterostructure wave-

guide phase modulator”, IEEE J. Quantum Electron., vol. 27, no. 3, pp. 726-736, 1991.

[6] J. Faist and F. K. Reinhart, “Phase modulation in GaAs/AlGaAs double-heterostructures. I. Theory, II. Experiment”, J. Appl. Phys., vol. 67, no. 11, pp. 6998-7012, 1990.

[7] T. Hausken, *High Performance Double Heterostructure and Quantum Well Waveguide Phase Modulators in GaAs/AlGaAs*, Ph. D. Dissertation, University of California at Santa Barbara, 1990.

[8] N. Peyghambarian et al., *Introduction to Semiconductor Optics*, Prentice-Hall, 1993.

[9] 김병성, GaAs/AlGaAs 광위상변조기와 흡수변조기가 집적된 파장가변 레이저다이오드에 관한 연구. 석사학위논문, 광운대학교, 1995.

[10] 김병성, 정영철 외 4인, “GaAs/AlGaAs 광위상 변조기의 제작과 측정”, 대한전자공학회 추계학술회의 논문집, 1995.

[11] 변영태 외 4인, “저손실의 단일 모드 Al_{0.042}Ga_{0.958}As/GaAs/Al_{0.042}Ga_{0.958}As strip-loaded 광도파로”. 한국광학회지, 제6권, 제2호, pp. 148-155, 1995.

[12] Y. T. Byun et al., Comparison of propagation losses of single-mode GaAs/AlGaAs waveguides in a three- and a five-layer structures, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 34, no. 8B, pp. L1051-L1054, 1995.

**Characterization of GaAs/AlGaAs Optical Phase Modulator
Fabricated by Self-Aligned Process**

Byoungsung Kim*, Youngechul Chung*, Young Tae Byun**,
Kyoung Hyun Park**, Sun Ho Kim** and Tong Kun Lim***

*Dept. of Electronic Communications Engineering, the Institute of New Technology,
Kwangwoon University, Seoul, 139-701, Korea

**Division of Electronics and Informations Technology,
Korea Institute of Science and Technology, Seoul, 130-650, Korea

***Dept. of Physics, Korea University, Seoul, 136-701, Korea

(Received: April 17, 1996)

An optical phase modulator is fabricated in GaAs/AlGaAs double heterostructure wafer grown by MOCVD. A self-aligned process, in which the same photoresist pattern is used for both the waveguide etching and the insulation layer formation, is developed and is found to be very useful. Fabry-Perot interference technique is applied to the measurement and the phase modulation efficiency is measured to be 22.5°/Vmm at 1.31 μm for TE polarization.