

## 저장벽 양자우물구조와 비대칭 패브리-페로 공명기 구조에 의한 고성능 2×4 S-SEED Array 구현

권오균 · 최영완 · 김광준 · 이일향  
한국전자통신연구소 기초기술연구부

이상훈\* · 원용협\*\*

한국전자통신연구소 광통신연구실\*/광교환연구실\*\*

유 형 모

Dept. of Materials Science and Engineering, Univ. of Washington,

(1993년 11월 22일 받음)

GaAs/Al<sub>0.04</sub>Ga<sub>0.96</sub>As 다중양자우물 구조를 이용한 반사형 PIN 다이오우드 S-SEED의 설계에 있어 낮은 동작전압, 높은 포화에너지 및 높은 반사율 on/off 강도비를 얻고자 저장벽 양자우물구조와 비대칭 패브리-페로 공명구조를 결합하였다. 2×4 array를 구성하는 S-SEED들은 역방향 동작전압 5V에서 평균적으로 13 이상의 반사율 on/off 강도비 (CR)와 약 24%의 반사율차 ( $\Delta R$ ) 및 91% 이상의 광쌍안정폭 ( $\Delta$ )을 나타내었다. 공명구조를 이용함으로써 PIN 다이오우드 진성영역내의 양자우물의 주기수를 줄일 수 있어 외부동작전압 없이도 CR~4.7, R~9.2%, ~22%의 향상된 무전압 광쌍안정 동작특성을 얻었다.

### I. 서 론

반도체소자인 self electro-optic effect device(SEED)는 GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As multiple quantum well(MQW) 구조에서 나타나는 비선형 전기광학흡수(nonlinear electroabsorption) 효과를 이용하여 광신호를 제어할 수 있어 광통신의 논리회로, 기억 및 변조소자 등에 사용하기 위한 많은 연구가 수행되어 오고 있다.<sup>[1-3]</sup> SEED는 MQW구조에서 우물(well) 층에 구속된 여기자(exciton)에 의한 빛의 흡수가 외부전장에 따라서 변화하는 특성을 이용한 것이다. 이때 가해지는 역방향 전장의 증가에 따라서 여기자 중심파장의 흡수율이 감소하는 특성으로부터 적절한 부하를 연결하여 광쌍안정성을 얻는다.<sup>[4]</sup> 광쌍안정성에 가장 적절한 부하는 SEED 자체로 알려져 있으며, SEED를 부하로하여 서로 대칭적으로 결합한

symmetric SEED(S-SEED)는 입력광의 요동(fluctuation)에 덜 민감하며 약한 입력광으로 강한 신호광을 제어할 수 있는 장점을 가지고 있어 기역소자나 논리소자로 크게 관심을 끌어들였다.<sup>[5,6]</sup>

기존의 SEED는 광흡수를 크게하기 위해 높은 장벽층과 많은 수의 양자우물층을 가진 MQW구조를 사용하였다. 이러한 MQW를 중간층(intrinsic layer)으로 하는 PIN 다이오우드 SEED는 높은 동작전압과 낮은 포화에너지(saturation energy)를 가지며, 많은 양자우물층의 성장으로 구조제어가 어려웠다.

근래에 이러한 단점을 개선하고 SEED의 성능을 향상시키기 위한 여러 방법들이 연구되었으며, 높은 에너지장벽으로 인한 느린 스위칭속도를 개선하고자 장벽층의 두께를 감소시키거나,<sup>[7]</sup> Extremely shallow quantum well(ESQW) 구조를 이용하여 낮은 전계에서 여기자가 쉽게 빠져나가는 여기자 이온화(exciton ionization)로 낮은 동작전압과 높은 광 포화에너지 및 전송자의 짧은 sweep-out time을 얻고자하는 노력이 있어왔다.<sup>[8-11]</sup> 다른

\* 본 연구는 체신부 및 한국통신의 93년도 기초 연구비 지원으로 수행되었음.

한편으로는 소자의 on/off 강도비를 개선하기 위해 Asymmetric Fabry-Perot(AFP) 공명기를 이용한 방법이 연구되었는데,<sup>[12-16]</sup> 이것은 입력광을 공명기내에 가둠으로써 적은 주기수의 MQW층으로도 충분한 빛의 흡수가 가능하며 공명조건을 조절하여 off 상태에서의 반사율( $R_{off}$ ) 값을 0으로 만들 수 있어 높은 on/off 반사율비의 실현이 가능한 장점을 가지고 있다. 최근에는 AFP구조와 ESQW구조를 결합함으로써 두 구조가 갖는 장점을 동시에 얻을 수 있는 AE-SEED(AFP-ESQW-SEED)가 광교환 등의 핵심소자로 큰 관심을 끌고 있다.<sup>[17,18]</sup>

본 연구에서는 ESQW과 AFP구조가 갖는 장점을 동시에 얻고자 두 구조를 결합한 반사형 AE-SEED array를 설계 하였으며, 설계된 구조는 MBE법으로 성장하여 일반적인 반도체 제작공정을 통해 단위소자 및 array들로 제작되었다. 이 단위소자 및 array 소자들의 특성을 조사하기 위하여 반사율측정, 광전류측정, 광쌍안정성측정 등의 실험을 수행하였으며, 이 실험적인 결과와 이론적으로 계산한 결과를 비교 고찰하고 AE-SEED구조로 향상된 동작특성에 대하여 논의하였다.

## II. AFP 구조의 최적화

최적화된 AFP-SEED의 설계를 위해서는 AFP 공명구조의 반사율(reflection,  $R$ ), 투과율(transmission,  $T$ ) 및 흡수율(absorption,  $A = 1 - R - T$ )의 이론적 계산이 필요하다. 하위거울의 반사율  $R_b$ , 상위거울 반사율  $R_t$ , 총흡수층의 두께  $d$ , 공명구조의 두께  $L$ 인 AFP 공명구조에  $E_0$ 의 크기를 갖는 평면전자기파가 굴절률  $n_1$ 인 매질로부터 굴절률  $n_2$ 인 공명기내로 수직으로 입사하여 굴절률  $n_3$ 인 매질로 투과되는 경우 투과 및 반사계수  $t$ 와  $r$ 은 전자기파의 크기  $E_t$ 와  $E_r$ 에 의해서 아래와 같은 관계로 정의된다.<sup>[19]</sup>

$$r = \frac{E_r}{E_0} = r_{12} + \frac{t_{12}t_{21}r_{23}e^{i2\delta}e^{-2\alpha L}}{1 - r_{21}r_{23}e^{i2\delta}e^{-2\alpha L}} \quad (1)$$

$$t = \frac{E_t}{E_0} = \frac{t_{12}t_{23}r_{12}e^{i\delta}e^{-\alpha L}}{1 - r_{12}r_{23}e^{i2\delta}e^{-2\alpha L}} \quad (2)$$

각 계면에서의 반사 및 투과계수들은 각층의 굴절률과  $r_{12} = (n_1 - n_2)/(n_1 + n_2)$ ,  $r_{21} = (n_2 - n_1)/(n_1 + n_2)$ ,  $t_{12} = 2n_1/(n_1 + n_2)$ ,  $t_{21} = 2n_2/(n_1 + n_2)$ 의 관계를 가지며  $e^{i\delta}$ 은 두께  $L$ 의 공명구조 통과시 위상변화로  $\delta = \pi n_2 L/\lambda$ 으로 주어진다.  $e^{-\alpha L}$ 는 흡수층에 의한 감소성분으로  $r$ 과 흡수계수  $\alpha$ 와의 관계는  $\alpha = 2\gamma$ 이다.  $r_{21} = -r_{12}$ ,  $t_{12}t_{21} = 1 - r_{12}^2$ , 그리고

$t_{12}^2 t_{23}^2 = (1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)$ 의 관계를 이용하고  $R_t$ 와  $R_b$ 의 각 반사 계수와의 관계가  $R_t = r_{12}^2 = r_{21}^2$ ,  $R_b = r_{23}^2$ 이므로 반사율  $R$ 과 투과율  $T$ 는 다음과 같다.

$$R = \frac{B + F \sin^2 \delta}{1 + F \sin^2 \delta} \quad (3)$$

$$T = \frac{C}{1 + F \sin^2 \delta} \quad (4)$$

이때, 식 (3), 식 (4)의 상수들은 아래와 같이 정의된다.

$$R_a = \sqrt{R_t R_b} e^{-\alpha d} \quad (5)$$

$$C = \frac{(1 - R_t)(1 - R_b)e^{-\alpha d}}{(1 - R_a)^2} \quad (6)$$

$$B = \frac{R_t[1 - (R_a/R_t)]^2}{(1 - R_a)^2} \quad (7)$$

$$F = \frac{4R_a}{(1 - R_a)^2} \quad (8)$$

식 (3)으로부터  $\delta$ 값이  $\pi$ 의 정수배 일 때  $R$ 은 최소값  $R_{off} = B$ 를 갖는다. 식 (7)에서  $R_t = R_a$ 일 때  $B$ 가 0이 되므로 식 (5)로부터  $R_{off} = 0$ 을 위한 아래의 조건을 얻게 된다.

$$\alpha(0)d = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{R_b}{R_t} \right) \quad (9)$$

여기서  $\alpha(0)$ 는 외부전장이 없을때 MQW의 흡수계수이며  $d$ 는 광흡수층의 총 두께로한 양자우물의 두께  $d_{qw}$ 에 양자우물의 갯수를 곱한 값에 해당한다.

## III. 실험방법

본 연구에서 이론적으로 설계한 SEED구조를 University of Washington에서 MBE 장치로 성장하였다. 먼저 반절연 GaAs 기판위에 14주기의 AlAs(721 Å)/Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As(606 Å) 하부거울층(quarter wavelength reflector stacks)을 성장하여 동작과장 부근에서 약95% 반사율을 갖도록 하였다. 그 위에  $n^+$  heavily-doped Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As층(5000 Å) 및 dopant가 구조성장시 MQW층으로 확산하는 것을 막기위한 완충용 undoped Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As층(300 Å)을 성장하였다. 이 층위에 Al<sub>0.04</sub>Ga<sub>0.96</sub>As(60 Å)/GaAs(100 Å) MQW층을 36주기 성장하고 다시 완충용 Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As층 200 Å 및  $p^+$  heavily-doped Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As층 약 3000 Å을, 또한 그 위층에  $p$ 전극 형성을위해 50 Å의  $p^+$  heavily-doped GaAs층을 성장하였다. 하위거울(bottom mirror)의

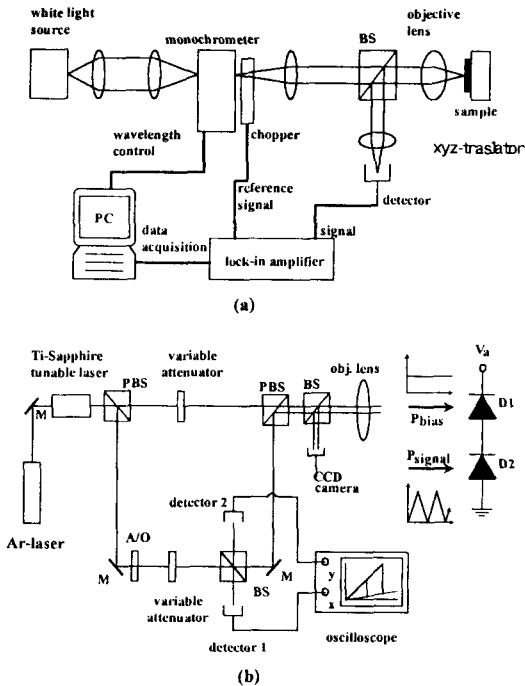


그림 1. 광학실험장치도. (a) 반사율 측정을 위한 장치; (b) 광쌍안정특성 측정을 위한 장치.

반사율이 95%이며 반도체와 공기의 계면에서 반사율이 30%이므로  $\alpha(0)$  값을  $16000 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[9]</sup>로 하여 식 (9)로부터 MQW 주기수를 36주기로 결정하였다. 여기에 습식식각에 의한 mesa형성, diode isolation 과정과 절연막 형성을 위한 SiNx deposition/RIE(reactive ion etching) 및 전극형성을 위한  $n^+$ ,  $p^+$ -metallization 등의 공정을 수행하여 S-SEED 및 S-SEED array를 제작하였다.

제작한 시료의 반사율 측정을 위한 광학 장치도를 그림 1(a)에 나타내었다. 백색광원과 분광기(monochrometer)를 이용해 750~950 nm의 파장영역에서 시료의 반사율 측정이 이루어졌으며, 이 영역에서 약 95%로 일정한 반사율을 갖는 것이 알려진 Au막으로 보정하였다. 광쌍안정(optical bistability) 특성 측정실험에는 아르곤(Ar) 레이저로 pumping한 860 nm 파장의 타이타늄-사파이어(Ti-Sapphire) 레이저를 광원으로 사용하였다. 이 광은 편광광분리기(polarization beamsplitter)로 나뉘어져 그림 1(b)에서 보이듯이 일부는 A/O 변조기(acoustic-optical modulator)를 통하여 삼각변조파형의 신호광(signal beam,  $P_{\text{signal}}$ )으로 한쪽 다이오우드( $D_2$ )에 입사하고 나머지(bias beam,  $P_{\text{bias}}$ )는 변조신호광 피크의 1/2 정도 크기로 일정하게 다른쪽 다이오우드( $D_1$ )에 입사하였다. 측

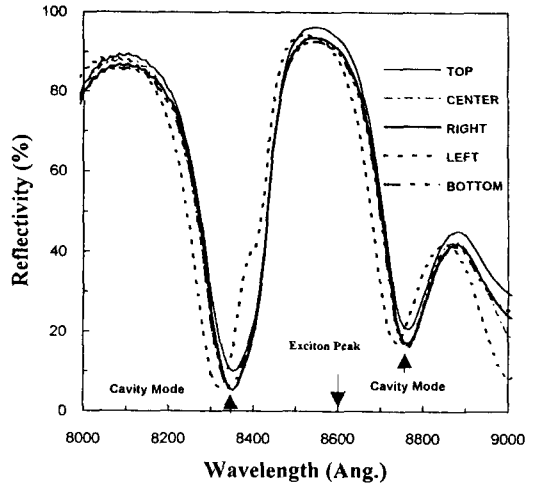


그림 2. SEED 구조로 성장된 2 inch wafer의 위치에 따른 반사율 스펙트럼. 중심점을 포함하여 상하 좌우로 1.5 cm 떨어진점에서 측정하였다.

정된 소자의 mesa 크기는  $150 \times 220 \mu\text{m}^2$ , window 크기는  $100 \times 200 \mu\text{m}^2$ 이며 실험에 사용한 광세기(광포화(optical saturation) 효과를 피하기 위하여 수백  $\text{W}/\text{cm}^2$  이하로 조절하였다.<sup>[5,20]</sup>

#### IV. 결과 및 논의

MQW 구조의 이론적 설계에서 여기자 피크파장을 860 nm으로 하고 외부전장이 없을 때 흡수계수  $\alpha(0)$ 값을  $16000 \text{ cm}^{-1}$ 로 전장인가시  $\alpha(V=-5 \text{ V})$ 의 값을  $5000 \text{ cm}^{-1}$ 으로 가정하였으며,<sup>[9]</sup> 이때  $-5 \text{ V}$  동작전압에서 반사율( $R_{\text{off}}$ )은 23.7%, 0 V에서는 0.01% 이하의 반사율( $R_{\text{off}}$ )을 갖도록 하였다.

그림 2는 SEED구조로 성장된 wafer 위치에 따른 반사율 스펙트럼을 보여준다. Wafer의 직경은 2 inch이며 가운데점(center)과 이것을 중심으로 상, 하, 좌, 우로 각각 1.5 cm 떨어진 다섯점을 선택하여 측정하였다. 그림 2로부터 AFP 구조에 의한 공명모우드가 MQW에 의한 여기자 피크파장(860 nm)과 크게 차이남을 알 수 있다. 이것은 성장된 공명층 두께가 설계한 두께와 다르거나, AlGaAs층의 Al 몰분율이 설계된 값과 다소 다르기 때문일 것으로 생각된다. 다섯점의 반사율측정이 거의 일치하는 것으로 보아 전체적인 MBE성장의 균일성은 양호하다고 볼 수 있다.

AFP 구조에서  $R_{\text{off}}=0$ 의 최적 조건을 만족하기 위해서는 MQW층의 여기자 피크와 공명기에 의한 공명모

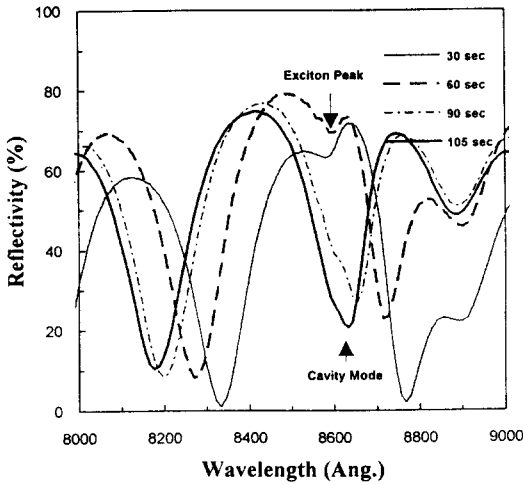


그림 3.  $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$ 가 4 : 1 : 100의 부피비로 만들어진 용액에서 식각에 따른 반사율 스펙트럼 변화로 식각속도는 약  $550 \text{ \AA}/\text{min}$  이었다.

우드를 잘 일치시켜야 하므로 소자제작공정 이전에 wafer의 표면을 습식식각하여 공명두께를 조절하였다. 식각에는  $H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$ 를 4 : 1 : 100의 부피비로 만든 용액을 사용하였으며, 식각속도는 약  $550 \text{ \AA}/\text{min}$ 이었다. 그림 3은 식각시간에 따른 반사율 스펙트럼을 나타내며 식각에 의해 공명기 두께가 변함에 따라서 공명모우드가 이동함을 잘 보여주고 있다.

그림 4는 습식식각으로 공명기 두께가 조절된 wafer로부터 제작한 SEED의 외부 전압인가에 따른 반사율 스펙트럼 변화를 보여준다. 이 소자의 반사율은 외부전압이 없을 때 최소값을 가지며, 전장의 세기가 증가할수록 커지고 있다. 따라서 이 소자는 설계한대로 SEED 동작에 필요한 normally-off( $R_{off}=0$ ) 조건을 만족하며, 860 nm 파장에서  $R_{on}(-5 V)$ 와  $R_{off}(0 V)$ 의 값은 각각 20%와 4.7%이다. SEED가 논리 및 기억소자로 사용되기 위해서는 부저항(negative resistance) I-V 특성에 의한 광쌍안정성을 나타내어야 한다. 그림 5는 860 nm 파장의 광조사에 의한 한 소자의 I-V 특성곡선 결과이다. 이 결과는 전압이 증가함에 따라 광전류가 감소하는 부저항을 보여주고 있으며, 큰 전압 ( $>4 V$ )에서는 그 변화정도가 크게 감소하여 이것이 그림 4에서의 반사율 변화와 밀접하게 관계함을 알 수 있다. 또한 그림 5에서 최대 광흡수에 의한 광전류 최대점( $A_{max}$ )이 순방향 전압 (0.5 V)에 위치하고 있음을 유의해야 한다. 이것은 ESQW를 채택함으로써 MQW의 장벽이 낮아졌고 또한 AFP를 이용함으로써 진성영역의 MQW층을 36주기(0.

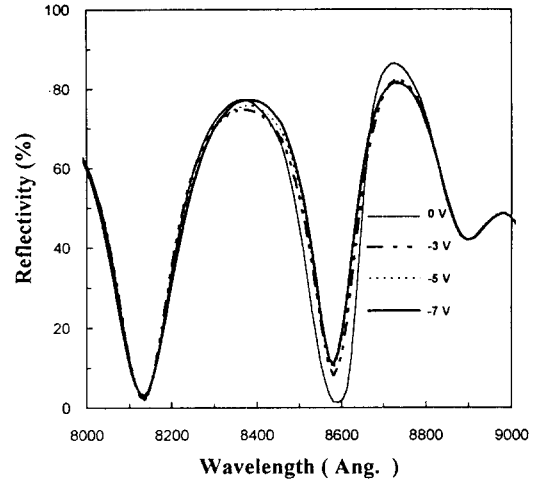


그림 4. 습식식각으로 공명기 두께를 조절하여 제작한 소자에서 외부인가전압에 따른 반사율 스펙트럼.

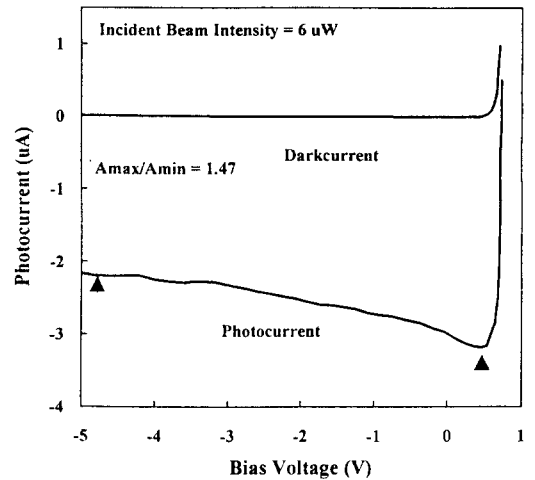


그림 5. 일정한 광세기의 860 nm 파장 입사광 조사에 대한 I-V 특성곡선으로 x축은 역방향전압을 y축은 전류양을 나타낸다. 입사광세기는  $6 \mu W$ 이며, beam 직경은  $60 \mu m$  크기이다.

$576 \mu m$ )로 얇게 줄일 수 있어 PIN 다이오우드의 내재 전위(built-in potential)에 의하여 외부전장 없이도 이미 전장을 받기 때문이다. 따라서 내재전위를 상쇄시키는 정도의 순방향 외부전압이 걸릴 때 광흡수는 그림 5와 같이 최대가 된다. 그림 6은 그림 5로부터 얻은 부저항 I-V 특성을 갖는 S-SEED의 광 쌍안정특성을 고찰하기 위한 부하곡선분석(load line analysis)을 나타내고 있다. 일정한 외부전압  $V_0$ 가 걸려있고 부하인  $D_1$  소자에 일

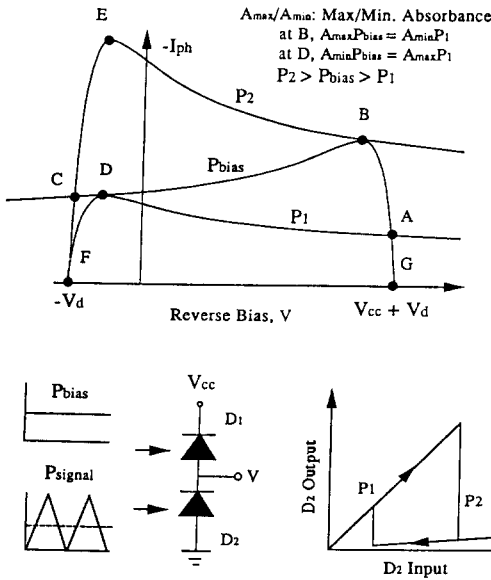


그림 6.  $D_2$  SEED 소자에 대한 부하로서  $D_1$  SEED를 사용하였을 때 부저항 I-V 특성에 의한 S-SEED의 부하곡선분석도(load line analysis). 곡선 ABDC는  $P_{bias}$  입력광에 의한 광전류 부하곡선; 곡선ADF는  $P_{signal}=P_1$ 일 때 광전류 I-V곡선; 곡선 BECF는  $P_{signal}=P_2$ 일 때 광전류 I-V곡선.

정한 광세기  $P_{bias}$ 가 입사하고 있을 때 광전류에 의한  $D_1$ 의 I-V 부하특성곡선은 그림 6의 ABDC곡선과 같이 나타난다. 이때  $D_2$  소자에 입사하는 삼각파로 변조된 광원의 광세기  $P_{signal}$ 가 0로부터  $P_2$ 까지 증가할 때  $D_2$  소자의 상태는 A점을 지나 B점까지 변하여 그림 4에서처럼 높은 전압에 해당하는 높은 반사율상태( $R_{on}$ )를 유지하며,  $D_1$ 은 낮은 전압에 해당하는 낮은 반사율상태( $R_{off}$ )를 갖는다. 만약  $D_2$  입력광의 세기가  $P_2$  이상이 되면  $D_2$ 의 상태는 B점에서 C점으로 바뀌어  $D_2$ 는 낮은 반사율을  $D_1$ 은 높은 반사율을 갖게된다. 반대로 입력광이 감소하기 시작하여  $D_2$  입력광이  $P_1$ 보다 큰 동안은  $D_2$ 의 상태는 C-D 선상에 해당하는 낮은 반사율 상태를 갖지만  $P_1$ 보다 작아질 경우  $D_2$ 의 전압이 D점에서 A점으로 바뀌어 높은 반사율 상태로 바뀌게 된다. 이로부터 부저항 I-V를 갖는 S-SEED는 입력광의 증감과정에 따라서 다른 두 천이문턱  $P_1, P_2$ 를 가지므로 하나의 입력에 대해 두개의 안정된 다른 상태가 가능한 광쌍안정성을 보이게 된다.

그림 5에서 광전류가 최대가 되는 점의 흡수율을  $A_{max}$ 라고 하고, S-SEED에 외부전압( $V_{cc}$ , 본실험에서는 5 V를 사용)이 걸리고 한쪽 SEED가  $A_{max}$ 의 흡수율을 가질

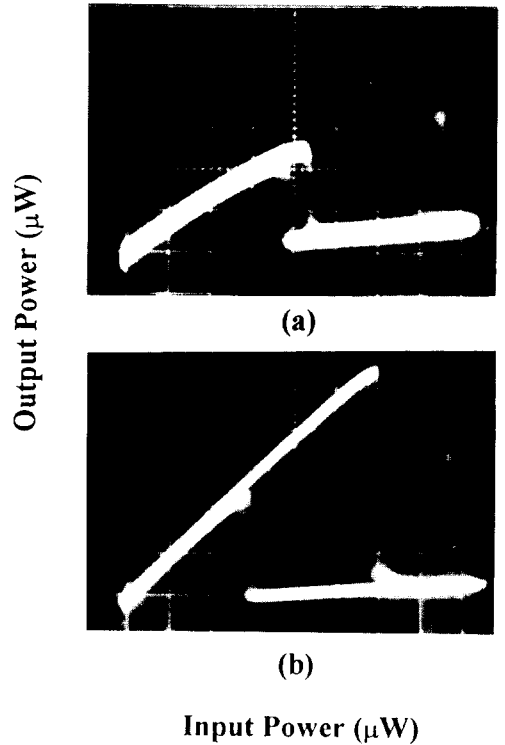


그림 7. S-SEED소자에서 나타나는 광쌍안정특성으로 (a)는 외부전압이 없을 때 (b)는 -5 volts일 때이다.; 그림의 x축의 크기는  $20 \mu W/div.$ 의 값을 가지며, (a)에서 y축은  $3 \mu W/div.$ 이며  $P_1=74 \mu W, P_2=88 \mu W, P_{bias}=80.7 \mu W$ ; (b)에서 y축은  $2.5 \mu W/div.$ 으로  $P_1=58 \mu W, P_2=120 \mu W, P_{bias}=83.4 \mu W$ 이다.

때 다른쪽의 SEED의 흡수율을  $A_{min}$ 으로 정의하면 그림 6의 부하곡선분석 두 천이점 B와 D로부터 아래의 관계를 얻는다.

$$A_{max}P_{bias} = A_{min}P_2 \tag{10}$$

$$A_{min}P_{bias} = A_{max}P_1 \tag{11}$$

여기에서  $P_{bias}$ 를 소거하여 다음의 식이 유도된다.

$$A_{max}/A_{min} = (P_2/P_1)^{1/2} \tag{12}$$

그림 1(b)의 실험장치를 이용한 S-SEED의 광쌍안정 특성 측정의 예를 그림7에 보였다. 여기에서는 표 1의 #8 S-SEED를 사용하였다. 그림 5에서처럼 순방향 전압에서 최대흡수점이 존재하면 외부에서 전압을 가해 주지 않아도 광쌍안정성이 있음을 그림 6의 부하곡선분

표 1. ESQW-AFP S-SEED 2×4 array들의 광학적 측정값 및 계산값.  $\lambda=860\text{ nm}$ ,  $P_{\text{signal peak}}=160\ \mu\text{W}$ , Beam spot size = 60  $\mu\text{m}$  dia.

Diode #	Ron (%)	Roff (%)	CR	$P_1$	$P_2$	$A_{\text{max}}/A_{\text{min}}$	$P_{\text{bias}}$	$\Delta$ (%)
#1								
0 V	13.2	3.3	4.0	49	62	1.125	55.1	23.5
-5 V	35.0	3.0	10.6	30	80	1.633	49.0	102.0
#2								
0 V	15.8	3.3	3.3	54	70	1.139	61.5	26.0
-5 V	32.5	3.3	10.6	39	106	1.649	64.3	104.1
#3								
0 V	12.3	3.7	3.2	62	78	1.122	69.5	23.0
-5 V	24.2	3.3	7.4	44	114	1.610	70.8	98.8
#4								
0 V	8.2	1.8	4.6	54	67	1.114	60.0	21.6
-5 V	18.7	1.3	14.0	39	94	1.553	60.0	90.8
#5								
0 V	9.2	1.7	5.4	70	86	1.108	77.5	20.6
-5 V	16.7	1.7	15.8	52	116	1.494	77.6	82.3
#6								
0 V	17.0	4.7	3.6	68	87	1.131	76.9	24.7
-5 V	35.0	5.0	7.6	56	136	1.558	87.2	91.7
#7								
0 V	12.7	3.3	3.8	70	86	1.108	77.5	20.6
-5 V	28.3	3.3	8.5	54	130	1.552	83.8	90.6
#8								
0 V	8.3	0.83	10.0	74	88	1.09	80.7	17.3
-5 V	25.3	0.83	30.4	58	120	1.438	83.4	74.3
Average	12.0	2.82	4.7			1.117		22.2
	26.9	2.72	13.1			1.561		91.8

석이 보여주고 있다. 그림 7(a)가 이 실험결과로  $V_{cc}=0\text{ V}$ 에서 광쌍안정성이 관측되었다.

그림 7(b)는  $V_{cc}=-5\text{ V}$ 인 경우이다. 입사광세기와 반사광세기의 비율을 앞서 언급한대로 Au막으로 보정하여  $R_{on}(=25.3\%)$ 과  $R_{off}(=0.8\%)$ 를 얻었으며 그 비율인 신호강도비(contrast ratio, CR)는 약 30 : 1, 그 차이인 반사율차  $\Delta R(=R_{on}-R_{off})$ 은 약 25%이다. 또한  $P_1$ 과  $P_2$ 의 측정치 58  $\mu\text{W}$ 와 120  $\mu\text{W}$ 로부터 식 (10)~(12)를 사용하여  $A_{\text{max}}/A_{\text{min}}=1.438$ ,  $P_{\text{bias}}=83.4\ \mu\text{W}$ 가 계산되며 따라서 광쌍안정폭  $\Delta(=(P_2-P_1)/P_{\text{bias}})$ 는 74%이다.

이때 같은 SEED의 I-V곡선인 그림 5에서 최대광전류값 (0.5 V)과 그보다 낮은점(-5 V)에서의 광전류값의 비율은 1.47로 위의  $A_{\text{max}}/A_{\text{min}}$  값에 근접한다. 입사광세기가

일정할 때 광전류가 흡수율에 비례하므로 이 결과는 그림 6에 요약된 S-SEED의 동작원리에 대한 설명과 일치한다.

표 1은 2×4 array를 이루는 각 S-SEED의 특성을 보여주고 있다. 직접측정된  $R_{on}$ ,  $R_{off}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ 로부터 CR,  $A_{\text{max}}/A_{\text{min}}$ ,  $P_{\text{bias}}$ ,  $\Delta R$ 의 값들이 위에서 설명한 관계들을 이용하여 유도되었다.  $R_{off}$ 값이 0이 되도록 설계되었으나 습식식각에 의한 중간보정에도 불구하고 평균 2.7% 가량되었다. 그러나 이들 중 가장 작은  $R_{off}$ 값을 보인 #8 소자와 다른 소자들을 비교할 때 일반적인 성능은  $R_{off}$ 가 얼마나 작은가에 크게 의존하지 않음을 알 수 있다. 외부전압 하에서의 평균특성이 CR~13,  $\Delta R$ ~24%,  $\Delta$ ~92%로 좋으며 더우기 무전압 광쌍안정성 동작특성이 균

일하게 나타나 array 제작시도 AE-SEED의 장점이 유지될 수 있음을 이 결과가 보여준다.

## V. 결 론

본 연구에서는 기존의 양자속박효과를 이용한 높은장벽 다중양자우물구조와 달리 낮은 동작 전압을 가지며, on/off 신호강도비가 증가된 ESQW-AFP S-SEED array를 설계 및 제작하였다. 성장된 공명구조의 광특성은 공명기의 두께에 민감하였으며, 제작된 소자의 특성을 향상하고자 습식식각을 통하여 공명기 두께를 조절하였다. 이로부터 동작전압  $-5V$ 에서 평균적으로 CR은 13.1이며,  $\Delta R$ 은 24%,  $\Delta$ 은 91%인  $2 \times 4$  array S-SEED를 얻었다. 또한 ESQW-AFP 구조로 인하여 외부전압 없이도 평균 4.7의 CR 및 9%의  $\Delta R$ , 22%의  $\Delta$ 으로 동작하는 매우 향상된 무전압(zero-bias) 광쌍안정동작특성을 관찰하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. S. Chemla, T. C. Damen, D. A. B. Miller, A. C. Gossard, W. Wiegmann, Appl. Phys. Lett., **42**, 864(1983).
- [2] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood and C. A. Burrus, Phys. Rev. B, **32**, 1043(1985).
- [3] D. A. B. Miller, J. S. Wiener and D. S. Chemla, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-22**, 1816(1986).
- [4] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, T. H. Wood, C. A. Burrus, Jr., A. C. Gossard and W. Wiegmann, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-21**, 1462(1985).
- [5] A. L. Lentine, H. S. Hinton, D. A. B. Miller, J. E. Henry, J. E. Cunningham and L. M. F. Chirovsky, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-25**, 1928(1989).
- [6] A. L. Lentine, F. A. P. Tooty, S. L. Walker, F. B. McCormick, Jr., R. L. Morrison, L. M. F. Chirovsky, M. W. Focht, J. M. Freund, G. D. Guth, R. E. Leibenguth, G. J. Przybylek, L. E. Smith, L. A. D'Asaro and D. A. B. Miller, IEEE J. of Quantum Electron., **QE-28**, 1539(1992).
- [7] G. D. Boyd, A. M. Fox, D. A. B. Miller and L. M. F. Chirovsky, L. A. D'Asaro, J. M. Kumon, R. F. Kopf and A. L. Lentine, Appl. Phys. Lett., **57**, 1843(1990).
- [8] A. M. Fox, D. A. Miller, G. Livescu, J. E. Cunningham, J. E. Henry and W. Y. Jan, Appl. Phys. Lett., **57**, 2315(1990).
- [9] R. A. Morgan, M. T. Asom, L. M. F. Chirovsky, M. W. Focht, K. G. Glogovsky, G. D. Guth, G. J. Przybylek and L. E. Smith, Appl. Phys. Lett., **59**, 1049(1991).
- [10] K. W. Goossen, L. M. F. Chirovsky, R. A. Morgan, J. E. Cunningham and W. Y. Jan, IEEE Photonics Tech. Lett., **3**, 448(1991).
- [11] K. W. Goossen, J. E. Cunningham and W. Y. Jan, Appl. Phys. Lett., **57**, 2582(1990).
- [12] W. Whitehead and G. Parry, Electron. Lett., **25**, 566(1989).
- [13] W. Whitehead, A. Rivers and G. Parry, Electron. Lett., **26**, 1589(1990).
- [14] R. H. Yan, R. J. Simes and L. A. Coldren, IEEE Photonic Tech. Lett., **2**, 118(1990).
- [15] R. J. Grindle and J. E. Midwinter, Electron. Lett., **27**, 2329(1991).
- [16] D. S. Gerber, R. Droopad and G. N. Maracas, IEEE Photonics Tech. Lett., **5**, 55(1993).
- [17] Y. W. Choi, O. K. Kwon and E. H. Lee, IEEE Photonics Tech. Lett., **5**, 1406(1993).
- [18] Y. W. Choi, O. K. Kwon, S. H. Lee, S. Shim, Y. H. Won and E. H. Lee, "ESQW-modulator and ESQW-SEED using asymmetric Fabry-Perot structure", in OSA Annual Meeting Technical Digest, Vol. 16, p. 53(1993).
- [19] H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filter*, Adam Hilger Ltd.,(1986).
- [20] A. L. Lentine, L. M. F. Chirovsky, L. A. D'Asaro, C. W. Tu and D. A. B. Miller, IEEE, Photonic Tech. Lett., **1**, 129(1989).

**High Performance 2x4 S-SEED Array  
with Extremely Shallow Quantum Well and Asymmetric  
Fabry-Perot Cavity Structure**

O. K. Kwon, Y. W. Choi, K. J. Kim and E. H. Lee

*Basic Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute,  
Taejon 305-606, Korea*

S. H. Lee

*Optical Communication Section, Electronics and Telecommunications Research Institute,  
Taejon 305-606, Korea*

Y. H. Won

*Photonics Switching Section, Electronics and Telecommunications Research Institute,  
Taejon 305-606, Korea*

H. M. Yoo

*Department of Materials Science and Engineering, University of Washington,  
Seattle, WA 98195, USA*

(Received: November 22, 1993)

We designed and fabricated a 2×4 symmetric self electro-optic effect device array using GaAs/Al<sub>0.04</sub>Ga<sub>0.96</sub>As extremely shallow quantum wells grown by a molecular beam epitaxy. By employing ESQW and asymmetric Fabry-Perot cavity structure simultaneously, we improved the performances of S-SEED such as on/off contrast ratio (CR), reflectivity change ( $\Delta R$ ), and optical bistability loop width ( $\Delta$ ). The average values of the elements of the 2×4 S-SEED array were CR~13.1, R~24%, and  $\Delta$ ~91%. It was found that the AFP cavity structure enhances the self-biased optical bistability in ESQW-SEED under no external bias. That is due to the decreased intrinsic region thickness in AFP-SEED structures, and which increases the built-in electric fields. The zero-biased S-SEED showed CR of ~4.7, R~9%, and  $\Delta$ ~22%.