

論文99-36D-7-9

# 최적 입사 광 전력 하에서의 대칭 ESQWs SEED의 비트 전송률 특성 분석

## (Bit-Rate Analysis of Various Symmetric ESQWs SEED under Optimized Input Power)

林延燮\*, 崔永完\*

(Youn-Sub Lim and Young-Wan Choi)

### 요 약

본 논문에서는 얇은 양자 우물(extremely shallow quantum wells, ESQWs)을 사용한 광 쌍안정 대칭 형 자기 전광 소자(symmetric self electro-optic effect device, S-SEED)의 성능에 있어서 높은 입사 광 전력의 영향을 조사한다. 다음과 같은 네 가지 ESQWs S-SEED 구조를 고려하였다: 무 반사 입힘(AR-coated) ESQWs S-SEED, back-to-back AR-coated ESQWs S-SEED, 비대칭 공명구조(AFP) ESQWs S-SEED, back-to-back AFP ESQWs S-SEED. 입사 광 전력이 증가함에 따라 On/Off 대조비, On/Off 반사율 차이와 같은 소자성능은 ohmic heating과 여기자 포화(exciton saturation)의 영향으로 심각하게 저하된다. 한편 소자의 스위칭 속도는 지속적으로 증가하다가 특정 입사 광 전력 하에서 점차 감소하기 시작한다. 직렬 광 연결 시스템(cascading optical interconnection system)에 있어서 소자의 최대 속도 스위칭 동작을 위한 최대 입사 광 전력의 최적화를 바탕으로 0 V 와 -5 V 의 외부 전압 조건에서 양자우물의 수를 변화시키면서  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  의 mesa 영역에 대하여 네 가지 ESQWs S-SEED의 시스템 비트 레이트를 모의 실험하고 그 결과를 분석하였다.

### Abstract

We investigate the effects of high input power on the performance of optical bistable symmetric self-electrooptic effect devices (S-SEEDs) using extremely shallow quantum wells (ESQWs). In this study, we consider the four ESQWs SEEDs; anti-reflection (AR)-coated ESQWs S-SEED, back-to-back AR-coated ESQWs S-SEED, asymmetric Fabry-Perot (AFP)-ESQWs S-SEED, and back-to-back AFP-ESQWs S-SEED. As the input power increases, device performances such as on/off contrast ratio, on/off reflectivity difference are seriously degraded because of ohmic heating and exciton saturation. On the other hand, switching speed of the device increases up to certain value and then begins to decrease. With reasonable optimization of the input power for the best switching speed operation of the devices in a cascading optical interconnection system, we simulate and analyze the system bit-rate of the various ESQWs S-SEEDs, for a mesa of  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  size, changing the number of quantum wells for the external bias of 0 V and -5 V.

\* 正會員, 中央大學校 電子工學科

(Department of Electronic Engineering, Chung-Ang University)

接受日字:1999年4月20日, 수정완료일:1999年6月12日

### I. 서론

최근에 광 쌍안정 자기전광 소자(SEED)의 성능이 GaAs 우물과  $x \leq 0.05$  인  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  배리어로 구성되어 있는 얇은 양자 우물 구조(extremely

shallow quantum well, ESQW)를 사용함에 의하여 보다 향상되어질 수 있다는 많은 연구가 진행되어 왔다<sup>[1-7]</sup>. 전형적인 다중 양자 우물 구조에서는 여기자(exciton)의 흡수 피크가 소자에 수직인 전계가 증가함에 따라 더 낮은 광 에너지 영역으로 이동한다. 이것은 양자 속박 스타크 효과(quantum confined stark effect, QCSE)라고 불리는데<sup>[8]</sup> 이 QCSE에 기초된 전형적인 SEED는 충분한 전계흡수 효과를 얻기 위하여 큰 외부 역 방향 바이어스를 요구한다. 또한 제한된 캐리어의 탈출 시간(escape time)은 양자 우물에서 광 생성 캐리어들의 증대로 이어지고 그것은 매우 낮은 여기자 포화 광 세기(exciton saturation intensity)로 귀결되어진다<sup>[11]</sup>. 그것에 반하여 ESQW의 주된 동작 매커니즘은 QCSE가 아니라 작은 수직 전계 하에서도 여기자의 레벨이 쉽게 제거되어지는 여기자 이온화 현상에 근간 되어있다. 이것은 기본적으로 낮은 장벽의 높이가 여기자의 전계 이온화를 금지시킬 수 없기 때문이다<sup>[1, 9]</sup>. 이러한 특성은 ESQW가 매우 높은 saturation intensity로 결과되는 광 생성된 캐리어들의 낮은 전계에서의 빠른 sweep out time을 가질 수 있게 해주며 높은 광 입사 전력 하에서 보다 향상된 동작 특성을 가지게 한다. 이들 특성들은 ESQW가 두 개의 p-i(ESQW)-n 다이오드가 직렬로 연결된 대칭 SEED (symmetric SEED, S-SEED)의 형태를 가진 광 쌍안정 소자에 적합하게 됨을 알 수 있다<sup>[1-7]</sup>. S-SEED의 스위칭 속도는 입사 광 전력이 증가함에 따라 증가하는데 이는 역 바이어스된 변조기가 커패시터로 생각되어질 수 있고 그것의 충전 또는 방전 속도가 광 전류에 선형적으로 비례하기 때문이다<sup>[10]</sup>. 결과적으로 ESQW S-SEED는 높은 비트 레이트 성능이 요구되어지는 광 스위칭 시스템에서 커다란 이점을 가지는 소자이다.

본 논문에서 그림 1에 보인 것처럼 네 개의 ESQW p-i-n 다이오드 구조들 즉 (a) 무반사 입힘(anti-reflection coated, AR-coated) ESQW S-SEED(E-SEED), (b) back to back AR-coated ESQWs S-SEED(BBE-SEED), (c) 비대칭 페브리 페롯(asymmetric Fabry-Perot, AFP) ESQW S-SEED(AE-SEED), (d) back to back AFP ESQWs S-SEED(BBAE-SEED)를 고려하였다.  $60 \text{ \AA} - Al_{0.04}Ga_{0.96}As / 100 \text{ \AA} - GaAs$  ESQWs의 수( $N_{qw}$ )를 변화시키면서 구조적으로 이들 ESQW

S-SEED의 높은 입사 광 전력하의 소자 성능을 조사한다.

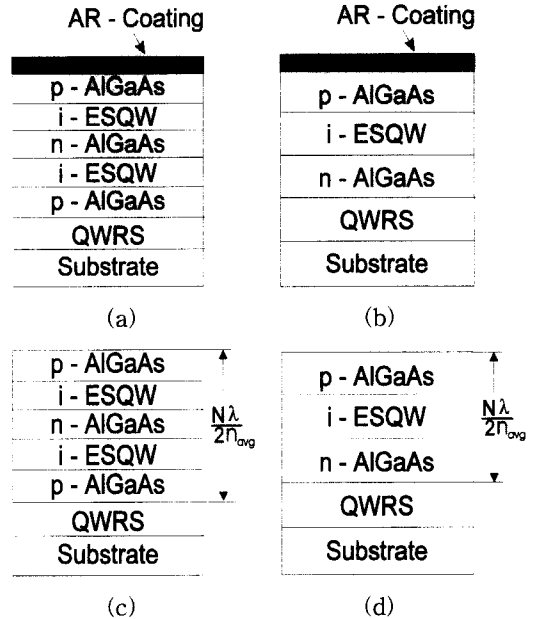


그림 1. 다양한 p-i(ESQW)-n 다이오드의 적층구조 (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c)AE-SEED (d)BBAE-SEED

Fig. 1. Schematic layer structure of various p-i(ESQW)-n diodes (a) E-SEED (b) BBE-SEED (c) AE-SEED (d) BBAE-SEED.

입력 광 전력이 증가함에 따라 On-Off 반사율 차이( $\Delta R = R_{on} - R_{off}$ , On/Off 대조 비(CR)와 같은 소자 성능이 여기자 포화와 power dissipation에 의하여 심각하게 저하된다. 여기서 후자는 특히 전기장 하에서의 광 생성 캐리어들의 움직임에 의한 thermal heating을 유도한다<sup>[11]</sup>. 입사 광 전력이 증가함에 따라 여기자 포화는 순방향 바이어스 하에서 흡수 계수(a)를 감소시키는 반면에 ohmic heating은 역 바이어스 하에서 a를 증가시킨다. S-SEED의 스위칭 속도는 일반적으로 입사 광 전력이 증가함에 따라 증가한다. 그러나 ohmic heating과 여기자 포화가 빠른 스위칭을 위한 높은 입사 광 전력의 이점을 억압하는 특정 입사 광 전력에 의하여 결정되는 스위칭 속도의 어떠한 제한이 존재한다. 이러한 제한을 넘어서는 입사 광 전력의 더 이상의 증가는 다양한 ESQW S-SEEDs의 시스템 비트 레이트 성능의 저하를 가져온다.

열 확산 모델<sup>[12]</sup>을 사용하여 입사 광 전력에 의하

여 인가된 온도의 상승을 모의 실험하고 소자의 성능에 있어서 여기자 포화화 ohmic heating의 영향을 조사하였다. 뿐만 아니라 최대의 스위칭 속도를 보장하는 최적화된 최대 입사 광 전력( $P_{opt}$ )의 합리적 근사값( $P_a$ )을 구하고 본 논문에서 그것의 유효성을 독립적으로 검증하였다. 그리고  $P_a$ 하에서  $N_{qw}$ 의 함수로써 광학적으로 직렬 연결된 네 가지의 ESQW S-SEED를 사용한 set-reset latch 시스템의 최대 비트 레이트를 계산하였다. 그림 2에서 보이는 바와 같이  $P_a$ 는  $\Delta R_0$ 이 여기자 포화화 ohmic heating 이 거의 존재하지 않는 매우 낮은 광 전력에서의 값( $\Delta R_0$ )의 절반이 되는 입사 광 전력 값으로 규정하였다.

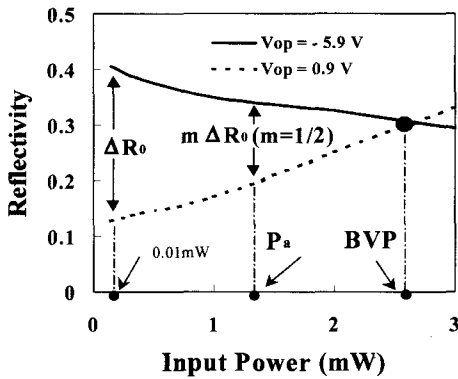


그림 2.  $P_a$ 와 BVP의 정의. 그림의  $\Delta R_0$ 는 0.01 mW 광 입사 전력 하에서의 반사율 차이이다  
 Fig. 2. The definition of  $P_a$  and BVP.  $\Delta R_0$  is the reflectivity difference at 0.01 mW optical input.

2 장에서는 4 개의 ESQW S-SEED의 적층 구조와 특성 그리고 AR-coated 구조와 AFP-cavity 구조에 대한  $\alpha$ 와 반사율 관계의 이론적인 분석을 보였고 3 장에서는 높은 광 입사 전력에 의하여 유도된 여기자 포화 그리고 ohmic heating 현상을 조사하였으며 4 장에서는 시스템 비트 레이트를 계산하기 위한 시뮬레이션 방법을 제시하고 최대 비트 레이트 성능을 만족시키는 입사 광 전력의 근사적 최적화를 수행하였으며 5 장에서는 네 가지 ESQW S-SEED의 종합적인 소자 성능을 분석하였다. 마지막으로 결론은 6 장에 기술하였다.

II. 흡수 계수-반사율 관련 이론적인 분석

본 논문에서 고려된 소자의 적층 구조는 Goossen

에 의하여 논증된 E-SEED<sup>[1]</sup>에 기초되어있다(그림 1(a)). 그림 1(b)에 보여진 BBE-SEED<sup>[5]</sup>의 구조는 ESQW가 두 개의 진성층(intrinsic layer)으로 균등하게 나누어져 있다는 것을 제외하고는 E-SEED의 구조와 동일하다. 또한 그림 1(c)와 (d)에 보여진 AE-SEED<sup>[2]</sup>와 BBAE-SEED<sup>[6]</sup>의 구조는 그것들이 AR-coated 구조가 아닌 AFP-cavity 구조라는 것을 제외하고는 각각 E-SEED, BBE-SEED와 동일한 구조를 가진다. AFP-cavity에서의 위상 정합 조건을 만족시키기 위하여 총 cavity 길이는  $N\lambda / 2n_{avg}$ 가 만족되어야 하는데 이것은  $p, n$ 의 전극층의 두께를 조절함에 의하여 쉽게 얻어질 수 있다. 여기서  $\lambda$ 는 동작 파장에 해당되는 여기자 피크 파장이고  $n_{avg}$ 는 cavity의 평균 굴절률,  $N$ 은 양의 정수이다. 또한 전체 진성 영역의 두께가  $N_{qw}$ 에 선형적으로 비례하는 것으로 가정하였는데 이것은 동일한  $N_{qw}$ 에 대하여 E-SEED와 AE-SEED의 소자 커패시턴스가 동일하다는 것을 의미하고 BBE-SEED와 BBAE-SEED의 경우도 마찬가지로 적용되어짐을 알 수 있다.

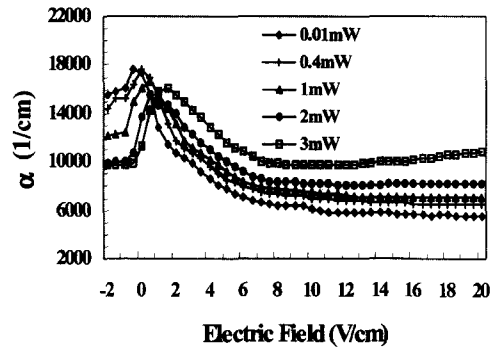


그림 3. 모의 실험된 다양한 전기장과 입사 광 전력 하에서의 흡수 계수( $\alpha$ )  
 Fig. 3. Calculated absorption coefficients( $\alpha$ ) of the various electric fields and input light powers.

고속 스위칭을 위한  $N_{qw}$ 의 최적화와 높은 입사 광 전력 하에서의 소자특성을 분석하기 위하여 다음과 같은 간단한 수식에 의하여 E-SEED의 보고된 실험 반사율 데이터<sup>[1]</sup>로부터 전기장과 입사 광 전력의 함수로써  $\alpha$ 를 구하였다(그림 3).

$$\alpha = -\frac{1}{2d_a} \ln\left(-\frac{R}{R_b}\right), \tag{1}$$

여기서  $d_a$ 는 전체 우물의 두께이고  $R_b$ 는 하층 거

울의 반사율이다.  $N_{qw}$ 의 변화에 따라 소자에 걸린 전기장은 동일한 바이어스 조건하에서 변화되고 이어서  $\alpha$ 의 변화를 유도하는데 이것으로부터 임의의  $N_{qw}$ 를 가진 AR-coated SEED의  $R_{on}$ 과  $R_{off}$ 의 값을 얻을 수 있다.

AFP 구조의 경우에는 입사 평면파의 추적과 전면층과 하층거울의 제한된 반사율을 가진 cavity 구조를 사용하여 광학적 특성 파라미터들을 얻어냈다<sup>[13]</sup>. 만일 평면파가 구조에 수직으로 입사된다면 반사율과 흡수율, 전송률 각각은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

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

$$A = \frac{1 - C - B}{1 + F \sin^2 \delta}, \quad (2-2)$$

$$T_r = \frac{C}{1 + F \sin^2 \delta}. \quad (2-3)$$

여기서  $C = (1 - R_f)(1 - R_b)e^{-\alpha d} / (1 - R_a)^2$ ,  $B = R_f(1 - (R_a/R_f))^2 / (1 - R_a)^2$ ,  $F = 4R_a / (1 - R_a)^2$ ,  $R_a = (R_f R_b)^{1/2} e^{-\alpha d}$ ,  $\delta = \pi nL / \lambda$ ,  $R_f$ 와  $R_b$ 는 각각 전면층, 하부 거울 층의 반사율이고  $L$ 은 총 cavity 길이 그리고  $n$ 은 cavity의 평균 굴절율이다. 식(1)로부터 얻어진  $\alpha$ 는 AFP-cavity 구조의 대응하는 반사율 값의 계산을 위하여 식(2)에 바로 적용된다. 위의 관련 상에 위상정합 조건을 적용함에 의하여 임의의  $N_{qw}$ 를 가진 AFP-cavity 구조의 반사율을 계산할 수 있다.

### III. Ohmic heating과 여기자 포화 현상의 분석

#### 1. Ohmic heating 현상의 분석

높은 입사 광 전력은 전체 소자의 주변 온도 상승 뿐 아니라 국부적인 온도 상승을 유도한다. 여기서 주변의 온도 상승은 외부적인 냉각에 의하여 완화되어질 수 있으나 활성 광학적 영역에서의 국부적인 온도 상승은 쉽게 제어될 수 없다. 온도의 상승은 기본적으로 주어진 파장에서의 광학적 흡수 특성을 증가시키면서 ESQW 물질의 에너지 밴드 갭의 감소를 초래하게 된다.  $p$ -i(ESQW)- $n$  다이오드에 있어서 열 발생의 주도적인 메커니즘은 비 복사성 재결합(nonradiative

recombination)에 의한 것이 아니라 소자에서의 ohmic heating에 의한 것이다<sup>[12]</sup>. 광 생성된 캐리어들은 역 바이어스와 내재 전위에 의한 전기장의 영향하에서 가속되어지고 이것은 광 전류 ( $I_{ph}$ )와 인가 전압의 곱에 의하여 정의되는 열 전력을 제공한다. ESQW 영역에서의 온도의 변화는 다음과 같이 주어지는 정상 상태 열 확산 방정식<sup>[12]</sup>에 의하여 얻어질 수 있다.

$$\nabla^2 T + p/K = 0, \quad (3)$$

여기서  $T$ 는 온도,  $p$ 는  $p = (V_{bi} - V_e) I_{ph} / A_i d_i$ 로 주어지는 단위부피당의 입사 열 전력으로 정의되는데 여기서  $V_{bi}$ 는 내재 전위,  $V_e$ 는 외부 바이어스 전압,  $K$ 는 열 전도도,  $A_i$ 는 광 조사 영역, 그리고  $d_i$ 는 총 진성 영역의 두께이다. 분석에 있어서 그림 4에 보여진 바와 같이 상수의  $p$ 를 가진 ESQW의 디스크와 같은 형태를 가진 조사 영역(illuminated area)을 가정하였다. 그러면 다음과 같은 식에 의하여 온도 변화의 분포특성을 얻을 수 있다.

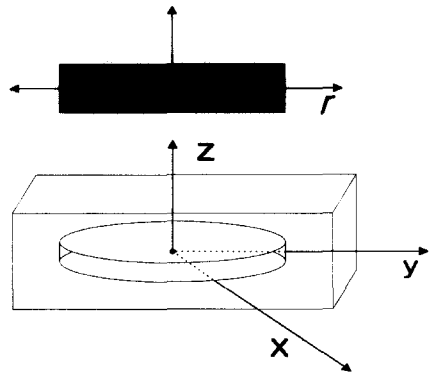


그림 4. 디스크와 같은 열원 평판의 기하학적 구조. 진성 영역의 중앙( $x=y=z=0$ )에서 최대  $\Delta T$ 가 존재한다

Fig. 4. Geometric structure of the disk-like heat source plate. At the center of intrinsic region( $x=y=z=0$ ), the maximum  $\Delta T$  exists.

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{p}{2\pi K} \times \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{z'=-\frac{d_i}{2}}^{z'=\frac{d_i}{2}} \int_{r=0}^{r=r_0} \frac{r \, dr \, dz' \, d\theta}{\sqrt{(x-r \cos \theta)^2 + (y-r \sin \theta)^2 + (z-z')^2}} \quad (4)$$

, 여기서  $r_0$  ( $1/e^2$  points)는 mesa 상의 spot 반경이고 최대의  $\Delta T$ 는  $(x, y, z) = (0, 0, 0)$ 에서 존재함을 가

정하였다.  $\Delta T$ 는 열 전도 구조에 의존하지만 열원이 디스크와 같은 평판 형태이므로 열 전도가 주로 다중층에 수직하게 이루어진다고 가정할 수 있다<sup>[11]</sup>. 사용되어진 GaAs의 열 전도도는  $0.46 \text{ (W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$ 이다.

해석을 쉽게 하기 위하여 Off 상태의 동작전압 ( $V_{op}$ )을 0.9 V, On 상태의 동작전압을 인가전압 0 V, -5 V에 대응하는 -0.9 V, -5.9 V 로 각각 가정하였다.  $V_{bi} = 1.5 \text{ V}$  와 다음의 (5)식에 의하여 얻어진 모의 실험된  $I_{ph}$ 를 사용함에 의하여

$$I_{ph} = (1 - R - T_r) \frac{q}{h\nu} \eta P_{in} \quad (5)$$

세 개의 서로 다른  $V_{op}$ 에 대한 광 입사 전력의 함수로서 최대의 온도 변화  $\Delta T(0, 0, 0)$ 를 얻었다. 여기서  $T_r$ 은 전송률,  $\eta$ 는 내부 양자 효율, 그리고  $P_{in}$ 은 입사 광 전력이다.  $N_{qw} = 40$ 인 4개의 ESQW S-SEED에 대한 모의 실험 결과를 그림 5에 보였다. 그림 5(c)와 5(d)는 AFP cavity 구조가 상대적으로 높은 전계 흡수를 가짐으로 하여 AR-coated 구조보다 상당히 큰  $\Delta T$ 를 가지게됨을 보여준다. 온도의 상승은 ESQW의 에너지 밴드 갭을 감소시키기 때문에

역 바이어스된 벌크와 같은 ESQW의  $\alpha$ 는 동작 파장에서 증가한다. 그러므로 역 바이어스 하에서 입사 광 전력의 증가에 따른 반사율의 감소는 ohmic heating의 영향으로써 해석되어질 수 있다. 반면에 순 바이어스에서의 온도의 증가는 미약하고 반사율의 변화 역시 동일하다. 이와 같은 해석으로부터 ohmic heating은 On 상태의 바이어스 조건하에서 소자 성능 저하의 주된 요인으로 작용함을 알 수 있다.

## 2. 여기자 포화의 영향 분석

소자의 고속 동작을 위하여서는 충분한 광 전력이 어떤 광학적 시스템 손실을 가지면서 한 단에서 다음 단을 스위칭하기 위하여 통과되어 지나가야 하기 때문에 높은 입사 광 전력이 요구된다. 그러나 입사 광 전력이 증가함에 따라 여기자 흡수는 포화되는 것으로 알려져 있다.  $N_{qw} = 40$ 을 가진 소자에 대한 입사 광 전력의 증가에 따른  $\alpha$ 의 변화는 그림 6에 보여진다. 입사 광 전력이 증가함에 따라  $\alpha$ 는 ohmic heating에 기인하여 On 상태의  $V_{op}$ 에서 증가하는 반면에 상대적으로 무시 할만한  $\Delta T$ 의 증가(그림 5)를 가지고 여기자 포화의 영향으로 Off 상태의  $V_{op}$ 에서 감소한다. BBE-SEED에서의 전기장은 동일한  $N_{qw}$ 와  $V_e$ 에 대

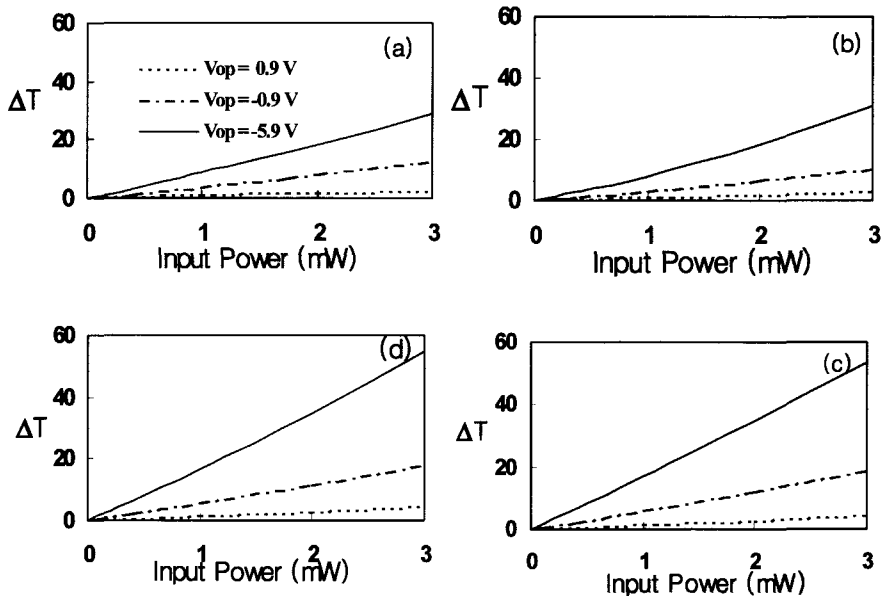


그림 5.  $N_{qw} = 40$ 인 다양한 ESQW S-SEED에 대한 입사 광 전력 변화에 따른  $\Delta T$ 의 변화 (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c)AE-SEED (d)BBAE-SEED

Fig. 5.  $\Delta T$  vs. the input power profiles for the various ESQW SEEDs with  $N_{qw} = 40$ . (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c) AE-SEED (d) BBAE-SEED.

하여 E-SEED의 전기장의 두 배의 세기를 가지므로 BBE-SEED는 그림 6에서 보여진 바와 같이 상대적으로 작은 여기자 포화의 영향을 받는다. 이와 같은 관련은 AE-SEED와 BBAE-SEED의 경우에도 바로

적용 될 수 있다.

그림 7은 동일한  $N_{qw} = 40$ 을 가진 네 가지 ESQW S-SEED에 대한 ohmic heating 과 여기자 포화의 영향하에서의 반사율 특성 곡선을 보인다. 고

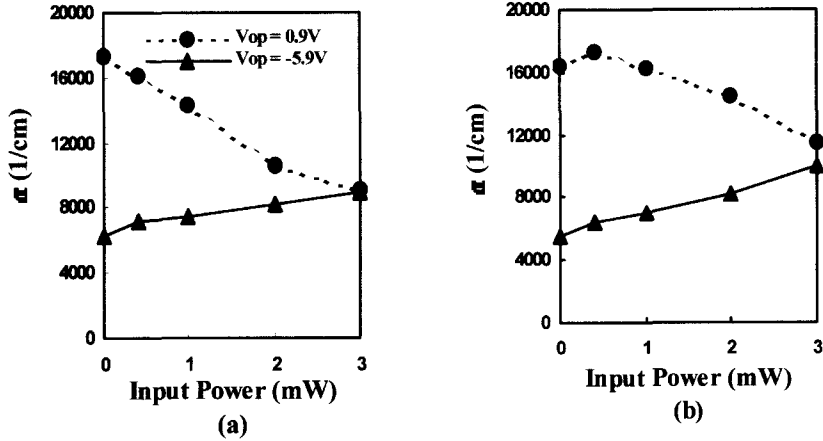


그림 6. 입사 광 전력의 함수로서의  $\alpha$ . 연속된 선은  $V_{op} = -5.9$  V, 점선은  $V_{op} = 0.9$  V에 대한 것이다. (a)E-SEED (b)BBE-SEED ( $N_{qw} = 40$ )

Fig. 6.  $\alpha$  as a function of input light power. The solid line is for  $V_{op} = -5.9$  V and the dotted line is for  $V_{op} = 0.9$  V. (a)E-SEED (b)BBE-SEED ( $N_{qw} = 40$ ).

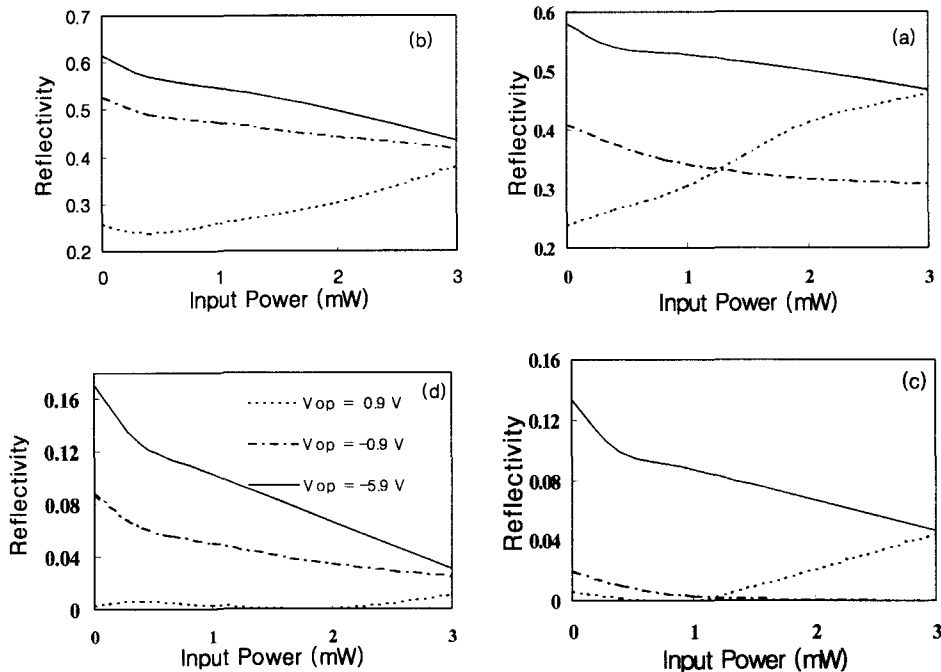


그림 7. 입사 광 전력의 변화에 따른 반사율의 변화 (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c)AE-SEED (d)BBAE-SEED ( $N_{qw} = 40$ )

Fig. 7. Reflectivity vs. the input optical power (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c)AE-SEED (d)BBAE-SEED ( $N_{qw} = 40$ ).

려중인 네 가지 SEED 구조에 대하여 순 바이어스 하에서의 광 전력의 증가에 따른  $\alpha$ 의 감소는 주로 여기자 포화 현상으로 설명되어질 수 있고 결과적으로 소자의 Off 상태의 반사율은 입사 광 전력의 증가에 따라 증가한다. 반대로 ohmic heating은 주로 큰 역 바이어스 하에서  $\alpha$ 를 증가시킨다. 그것에 의하여 소자의 On 상태의 반사율은 입사 광 전력의 증가에 따라 감소하게 됨을 알 수 있다.

#### IV. 시스템 비트 레이트 계산

S-SEED를 사용한 기본적인 광 병렬 스위칭 시스템은 두 단의 직렬 연결된 S-SEED 플립플롭(flip-flop)으로 구성된다. 여기서 첫 번째 단의 출력으로부터 전송된 입사 클럭 전력은 두 번째단의 입력 신호가 된다. 이 광 전력전송의 메카니즘은 클럭 입사 전력이 첫 번째단의 소자 상태를 읽고 두 번째단의 상태를 세팅시키는 것으로써 기술되어질 수 있다. 이 과정에서 시스템 비트 레이트는 광 전류가 두 번째 단의 SEED를 충전시키는 시간에 의하여 제한된다. 광 전류는 두 번째 단에서의 입사 광 전력에 선형적으로 비례하기 때문에 시스템 비트 레이트는 첫 번째 단의 출력 광

전력을 구함에 의하여 그리고 두 번째 단 소자의 스위칭 시간을 계산함에 의하여 얻어질 수 있다<sup>[14]</sup>. 그러나 앞에서 기술한 바와 같이 ohmic heating과 여기자 포화와 같은 성능제한 요소들은  $\Delta R$ ,  $CR$ 을 제한하고 그것에 의하여 입사 광 전력이 증가함에 따라 S-SEED의 스위칭 속도는 최대( $P_{opt}$ 에서)에 도달할 때까지 지속적으로 증가하다가 감소하기 시작한다. 다양한 구조와 다른  $N_{qw}$ 에 대하여 정확한  $P_{opt}$ 의 값들을 구한다는 것은 매우 복잡한 작업이 요구된다. 본 논문에서는 소자 성능 파라미터들의 포괄적인 분석을 통하여  $P_{opt}$ 에 대한 훌륭한 근사 값으로써  $P_a$ 를 얻어 내었다. 이 값의 유효성을 검증하기 위하여 먼저,  $m = \Delta R_p / \Delta R_0$ 라고 정의하고  $m$ (또는, 입사 광 전력)의 변화에 따른 다양한 ESQW S-SEEDs의 비트 레이트 성능을 그림 8(a)에 보인 바와 같이 조사하였다. 여기서  $\Delta R_p$ 는 주어진 입사 광 전력 하에서의 반사율 차이이다.  $V_e = 0$  V와  $-5$  V하에서 최대 비트 레이트 성능을 허용하는  $m$ 의 값은 본 연구에서 고려된 모든 소자에서 약 1/2이다. 그리고  $m = 1/2$ 에서의 입사 광 전력( $P_a$ )은 여기자 포화와 ohmic heating에 의하여 제한된 임계 입사 광 전력으로써 고려될 수 있다.  $P_{opt}$ 와  $P_a$  각각에 의하여 얻어진 시스템 비트 레이트 값

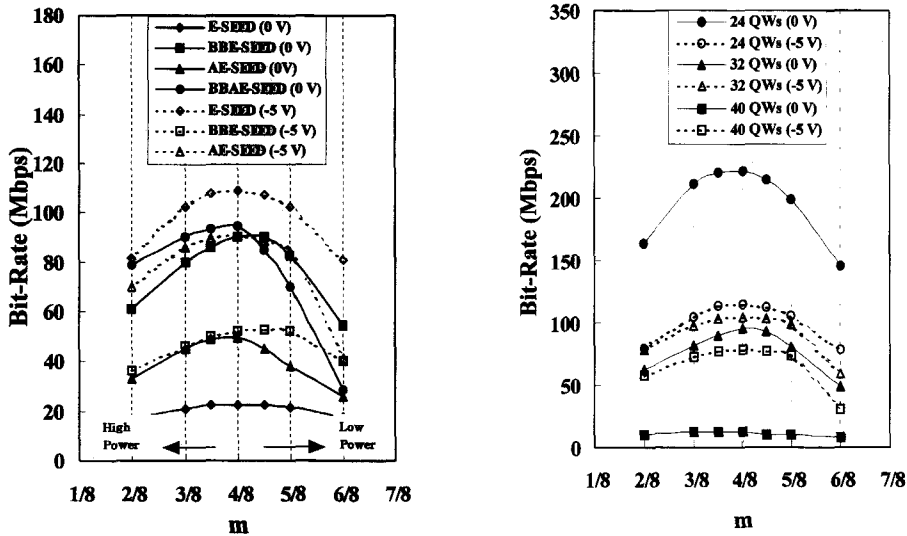


그림 8. (a)  $m$ 의 변화에 따른 다양한 ESQW S-SEEDs에서의 비트 레이트 성능 변화. (E-SEED with  $N_{qw} = 60$ , BBE-SEED with  $N_{qw} = 60$ , AE-SEED with  $N_{qw} = 36$ , BBAE-SEED with  $N_{qw} = 36$ ) (b)  $N_{qw}$ 와  $m$ 의 변화에 따른 AE-SEED의 비트 레이트 성능 변화.  $P_a$  값들은  $m = 1/2$ 인 점에서 결정된다

Fig. 8. (a) The bit rate performance for various ESQW S-SEEDs as the  $m$  changes. (E-SEED with  $N_{qw} = 60$ , BBE-SEED with  $N_{qw} = 60$ , AE-SEED with  $N_{qw} = 36$ , BBAE-SEED with  $N_{qw} = 36$ ) (b) The bit rate performance for AE-SEED as  $m$  and  $N_{qw}$  change.  $P_a$ 's are determined at  $m = 1/2$  point.

들은 고려된 모든 소자에서 5% 이내의 허용 오차 내에서 거의 동일한 결과를 보인다. 또한 그림 8(b)는 AE-SEED의  $N_{qw}$ 의 변화에 따른 위 결과의 유효성을 검증하였다(다른 소자의 경우에도 모두 유사한 결과가 얻어진다). 모의 실험 결과로부터  $V_e$  와  $N_{qw}$ 에 관계없이 최대 비트 레이트 성능을 가져오는 최적화된  $m$ 의 합리적 근사값은 1/2임을 알 수 있다. 높은 입사 광 전력 동작 하에서 네 가지의 ESQW S-SEEDs의

실질적인 평가를 위하여 입사 광 전력으로써  $P_a$ , 1.625  $\mu\text{m}$ 의 beam radius, 860 nm의 동작파장, 그리고  $5 \times 5 \mu\text{m}$ 의 mesa 영역을 고려하였다. 광학적으로 직렬 연결된 set-reset latch의 비트 레이트는 다음과 같은 식에 의하여 기술되어질 수 있다<sup>[15]</sup>.

$$\text{system bit-rate}(\eta_b) = \frac{q P_a R_{opt}}{4h\nu C \Delta V} \left( \frac{1}{A} + \frac{1}{B} \right)^{-1}, \quad (6)$$

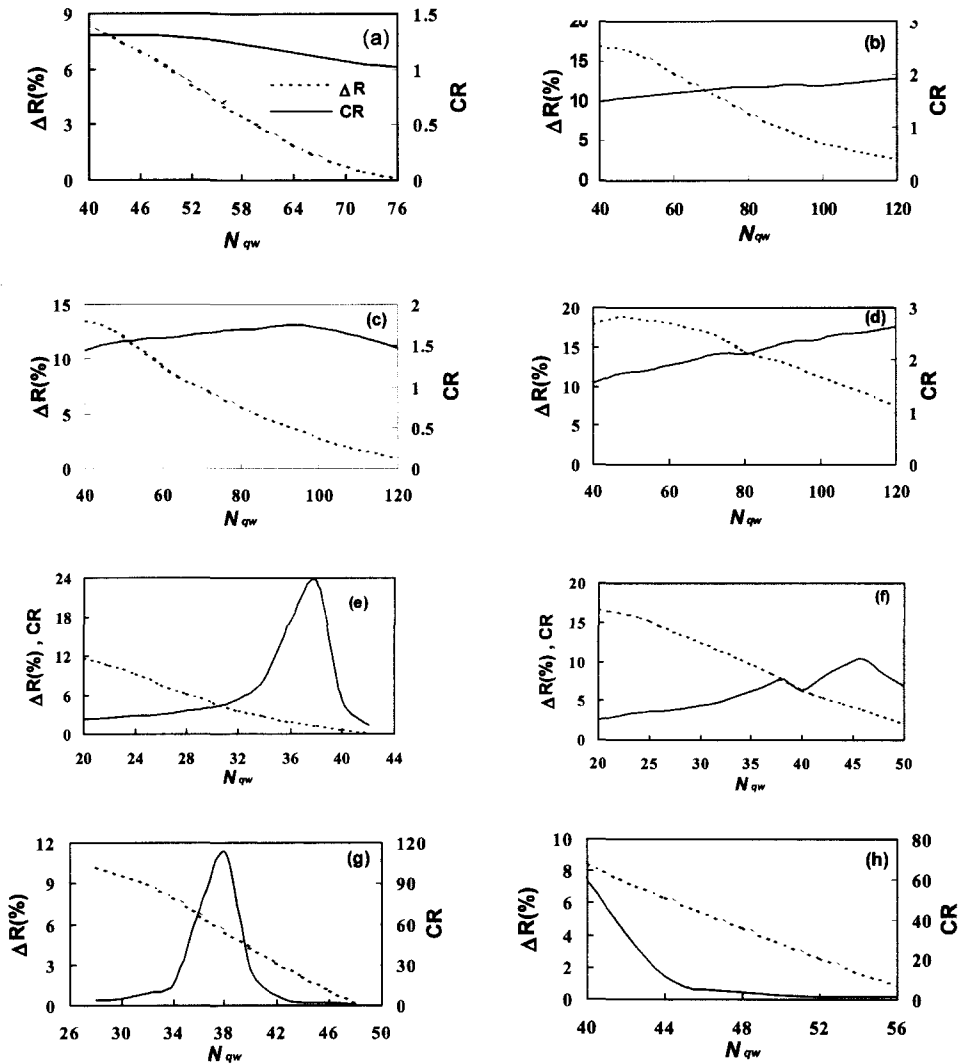


그림 9.  $N_{qw}$ 의 변화에 따른 0 V와 -5 V 외부 바이어스 하에서의  $\Delta R$ ,  $CR$  곡선. (a)E-SEED at 0 V (b)E-SEED at -5 V (c)BBE-SEED at 0 V (d)BBE-SEED at -5 V (e)AE-SEED at 0 V (f)AE-SEED at -5 V (g)BBAE-SEED at 0 V (h)BBAE-SEED at -5 V

Fig. 9.  $\Delta R$  and  $CR$  profiles at 0 V and -5 V external bias with the change of  $N_{qw}$ . (a)E-SEED at 0 V (b)E-SEED at -5 V (c)BBE-SEED at 0 V (d)BBE-SEED at -5 V (e)AE-SEED at 0 V (f)AE-SEED at -5 V (g)BBAE-SEED at 0 V (h)BBAE-SEED at -5 V.



여기서  $A = R_{on}(1-x)(1-R_{on}-T_{on}) - R_{off} [1-x(1-2y)](1-R_{off}-T_{off})$ ,  $B = R_{on}(1-x)(1-R_{off}-T_{off}) - R_{off} [1-x(1-2y)](1-R_{on}-T_{on})$ ,  $C$ 는 디바이스 커패시턴스,  $\Delta V$ 는 쌍안정 동작 전압 변화,  $R_{opt}$ 는 0.3으로 가정된 광학적 시스템의 손실,  $q/h\nu$ 는 0.69,  $x$ 는 전체 전력 변화에서의 부분적인 비균일성,  $y$ 는 전체 전력 변화에 대한 국부전력의 비균일성을 나타낸다. AR-coated 구조의 전송률  $T_{on}$ 과  $T_{off}$ 는  $T_r = (1 - R_b) e^{-\alpha d}$ 에 의하여 AFP-cavity 구조의 경우에는 2장에서 제시한 방식에 의하여 이론적으로 계산되었다.

여기서  $x$ 는 0 그리고  $y$ 는 1로 가정하였다. 2장에서의 반사율- $\alpha$  관련 모의 실험으로부터 얻어진 다양한 구조들에 대한 반사율 데이터를 사용함에 의하여  $N_{qw}$ 의 변화에 따른  $P_a$ 에서의  $AR$  과  $CR$ 의 곡선을 얻었다(그림 9).

V. 네 가지 ESQW SEED의 성능 분석

1. E-SEED

그림 1(a)의 소자 적층 구조상에 기초하여 0 V와 -5 V의 외부 인가전압 하에서 입사 광 전력과  $N_{qw}$ 를 변화시키면서 E-SEED의 성능제한을 조사한다. 그림 7(a)에 보여진 것처럼 입사 광 전력의 함수로서의 반사율 곡선이 각 동작 전압에 대하여 얻어진다.  $R_{on}$ 은 ohmic heating에 기인하여 감소하고 반면에  $R_{off}$ 는 여기자 포화에 기인하여 증가한다. 이들 두 현상은 높은 광 전력에 의하여 소자가 조사될 때 공존하기 때문에 이들은 소자의 성능 평가를 위하여 동시에 고려되어야만 한다. 여기서  $\Delta R$ 이 0,  $CR$ 이 1이 되는 입사 광 전력을 쌍안정성 소멸 전력 (bistability vanishing power, BVP)이라 정의하였다(그림 2).

이 전력 하에서 스위칭 동작은 불가능하게 된다.

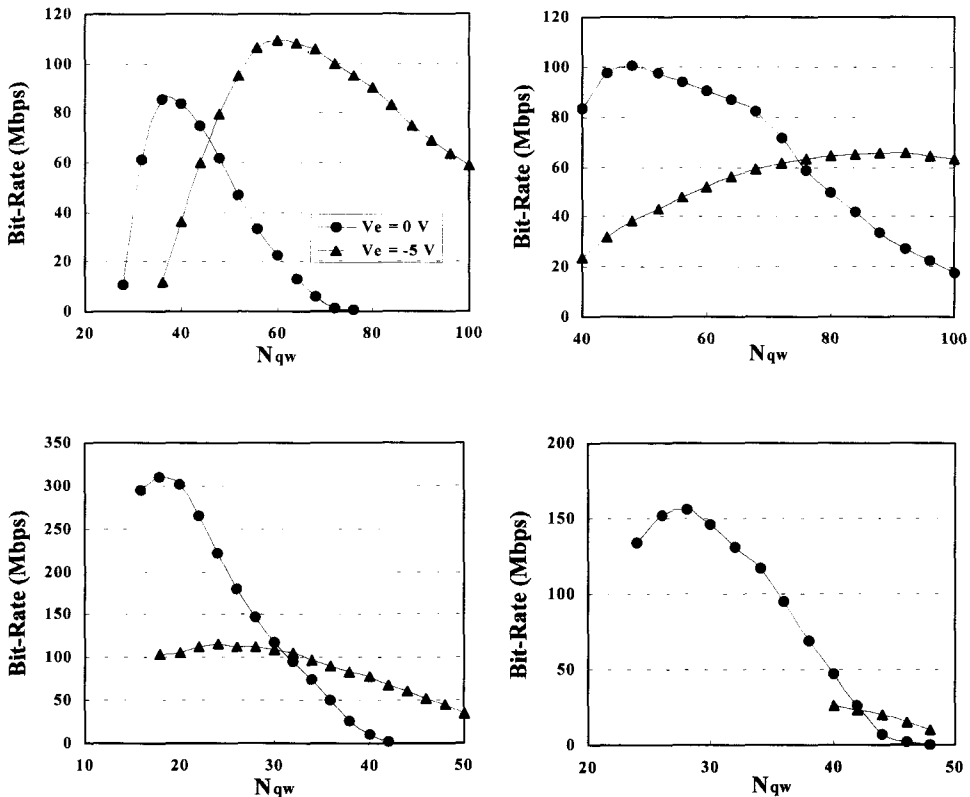


그림 10.  $N_{qw}$  변화에 따른 다양한 ESQW S-SEED의 비트 레이트 성능 (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c)AE-SEED (d)BBAE-SEED

Fig. 10. Bit-rate performance of the various ESQW S-SEEDs with the change of  $N_{qw}$  (a)E-SEED (b)BBE-SEED (c)AE-SEED (d)BBAE-SEED.

표 1. E-SEED의 성능 평가

Table 1. Performance Estimation of the E-SEED.

$N_{qw}$	Device Capacitance [fF]	$V_e = 0$ [V]				$V_e = -5$ [V]			
		$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	$CR$	$\eta_b$ [Mbps]	$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	$CR$	$\eta_b$ [Mbps]
32	5.5	1.02	9.92	1.27	61.2	-	-	-	-
36	4.9	0.83	9.35	1.29	85.5*	1.39	17.85	1.48	12.0
40	4.4	0.63	8.42	1.30	83.7	1.38	16.93	1.49	36.1
48	3.8	0.38	6.48	1.31	62.0	1.25	16.35	1.57	79.4
56	3.1	0.24	4.06	1.25	33.5	1.16	14.73	1.63	106.1
60	3.0	0.20	2.95	1.21	22.7	1.06	13.61	1.65	109.1*
68	2.7	0.12	1.11	1.10	6.0	0.92	11.51	1.69	105.9
76	2.3	0.03	0.15	1.02	0.3	0.80	9.58	1.75	95.2

BVP는  $N_{qw}$ 의 증가에 따라 주로 전체적인 흡수의 증가에 기인하여 감소한다. 외부 바이어스 0 V와 -5 V에서  $N_{qw} = 40$ 에 대한 BVP들은 각각 약 1.25 mW, 3.11 mW 이고  $N_{qw} = 60$ 에 대해서는 각각 0.45 mW, 2.51 mW가 얻어졌다. 결과적으로  $P_a$ 는 표 I에 보여진 바와 같이  $N_{qw}$ 의 증가에 따라 감소 하게 된다.

그림 9(a)와 9(b)는 외부 바이어스 0 V, -5 V에서의  $N_{qw}$ 의 변화에 따른  $\Delta R$ 과  $CR$  곡선을 보인다.  $V_e = 0$  V에서의 최대  $CR$ 값은 0.38 mW의  $P_a$ 와  $N_{qw} = 48$ 에 대하여 1.31이고  $\Delta R$ 은  $N_{qw}$ 가 증가함에 따라 단조적으로 감소한다. 그림 10(a)는 E-SEED를 사용한 광학적으로 직렬 연결된 시스템의 비트 레이트를 보인다.  $V_e = 0$  V에서  $N_{qw} = 36$  인 E-SEED는  $P_a = 0.83$  mW,  $\Delta R = 9.35$  %,  $CR = 1.29$ 에서 86 Mbps의 최대 비트 레이트를 보인다. 또한,  $V_e = -5$  V에서  $N_{qw} = 60$ 인 E-SEED는  $P_a = 1.06$ ,  $\Delta R = 13.61$  %,  $CR = 1.65$ 에서 최대 비트 레이트 109 Mbps를 갖는다. 이들 결과로부터 E-SEED는 명백하게 0 V 바이어스에서 보다 -5 V 바이어스 하에서 더 좋은 비트 레이트 성능을 보임을 알 수 있다.

2. BBE-SEED

E-SEED의 경우와 동일한 결과로서 BBE-SEED도 또한 입사 광 전력의 증가에 따라  $R_{on}$ 의 감소와  $R_{off}$ 의 증가의 일반적인 특성을 보인다. 그러나 Off 상태의 동작 전압에서 소자를 가로지르는 상대적으로 큰 전기장의 세기에 기인하여 BBE-SEED는 E-SEED의 경우보다 작은 여기자 포화 효과를 보인

다. 이것은 소자에 걸린 전기장의 세기가 증가함에 따라 saturation intensity가 증가하기 때문이다. 결과적으로 BBE-SEED의 BVP는 E-SEED의 BVP 보다 큰 값을 가진다. 0 V와 -5 V의 외부 바이어스에서  $N_{qw} = 60$ 에 대한 BVP의 값은 각각 약 2 mW, 3.15 mW이다. 또한  $N_{qw} = 80$ 에 대해서는 각각 약 1.27 mW, 3.02 mW의 값을 가진다. 여기서  $N_{qw} = 80$ 인 경우의 BVP 값은  $N_{qw} = 40$ 을 가진 E-SEED의 값과 유사함을 알 수 있는데 이것은 주로 동일한 Off 상태의 동작전압에 대하여 BBE-SEED의 증가된 saturation intensity로부터 비롯되는 결과이다.

BBE-SEED에 있어서의  $P_a$ 의 값도  $N_{qw}$ 가 증가함에 따라 감소되지만 표 II에 보여진 바와 같이 E-SEED의 값에 비하여 더욱 증가된 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 9(c)와 9(d)는  $N_{qw}$ 의 변화에 따른 외부 바이어스 0 V와 -5 V에서의  $\Delta R$ 과  $CR$ 의 곡선을 보인다.  $V_e = 0$  V에서의 최대  $CR$ 은  $N_{qw} = 96$ 에 대하여 1.75의 값을 가지며  $V_e = -5$  V에서는 단순히  $N_{qw}$ 가 증가함에 따라 증가하는 특성을 보인다.  $V_e = 0$  V,  $V_e = -5$  V에서의  $\Delta R$ 의 값은  $N_{qw}$ 의 증가에 따라 감소한다.

비트 레이트의 관점에서 BBE-SEED는 E-SEED의 경우보다 거의 4 배나 큰 소자 커패시턴스를 가지게 되는데 예를 들어  $N_{qw} = 40$ 의 E-SEED의 소자 커패시턴스는 약 4.4 fF인데 반하여 동일한  $N_{qw}$ 의 BBE-SEED의 소자 커패시턴스는 17 fF에 이른다. 이와 같이 큰 소자 커패시턴스는 큰 전기장 변조와 큰 전계 흡수와 같은 BBE-SEED의 이점을 완화시키

표 2. BBE-SEED의 성능 평가

Table 2. Performance Estimation of the BBE-SEED.

$N_{qw}$	Device Capacitance [fF]	$V_e = 0$ [V]				$V_e = -5$ [V]			
		$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	$CR$	$\eta_b$ [Mbps]	$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	$CR$	$\eta_b$ [Mbps]
40	17	2.07	13.54	1.44	83.1	2.12	17.84	1.57	23.8
48	14.4	1.46	12.64	1.54	100.2*	1.85	18.95	1.74	38.5
52	13.3	1.29	11.48	1.55	97.4	1.73	18.66	1.79	42.9
60	11.6	1.08	9.42	1.59	90.4	1.59	18.16	1.90	52.2
68	10.3	0.96	7.77	1.63	82.0	1.46	17.27	2.04	59.0
84	8.4	0.55	5.06	1.71	41.7	1.37	13.93	2.19	64.9
88	8.0	0.47	4.47	1.73	33.9	1.34	13.41	2.26	65.7*
96	7.3	0.36	3.45	1.75	22.4	1.28	12.08	2.38	64.6

다. 그림 10(b)는 BBE-SEED를 사용한 광학적으로 직렬 연결된 스위칭 시스템의 비트 레이트 특성을 보인다.  $V_e = 0$  V에서  $N_{qw} = 48$ 인 BBE-SEED는  $P_a = 1.46$  mW,  $\Delta R = 12.64$  %,  $CR = 1.54$ 에서 100 Mbps의 최대 비트 레이트를 보이며  $V_e = -5$  V의 경우에  $N_{qw} = 88$ 을 가진 BBE-SEED는  $P_a = 1.34$  mW,  $\Delta R = 13.40$  %,  $CR = 2.26$ 에서 66 Mbps의 최대 비트 레이트를 보인다. 이들 결과로부터 BBE-SEED는 E-SEED의 경우와는 반대로  $V_e = -5$  V에서의 경우보다  $V_e = 0$  V에서 더 좋은 비트 레이트 성능을 보임을 알 수 있다.

### 3. AE-SEED

그림 1(c)에 보여진 기본적인 소자 구조를 기반으

로 AE-SEED의 성능이 분석된다. AFP cavity 구조의 신장된 흡수특성은 3장에서 토의되었던 큰 ohmic heating의 영향을 받게된다.  $N_{qw} = 40$ 의 AE-SEED의 BVP는  $V_e = 0$  V,  $-5$  V에서 각각 약 1.17 mW, 3.02 mW의 값을 가진다.  $P_a$ 는  $N_{qw}$ 의 증가에 따라 역시 감소한다(표 III). 그림 9(e)와 9(f)에서 보여진 것 처럼  $V_e = 0$  V에서의 최대  $CR$ 값은  $N_{qw} = 38$ 일 때 23.35의 값을 가지며  $V_e = -5$  V에서는  $N_{qw} = 46$ 일 때 10.38의 값을 가진다. 이 구조에서 임피던스 정합조건은 다음 식에 의하여 주어질 수 있다<sup>[21]</sup>.

$$\alpha_0 d_a = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{R_b}{R_f}\right) \quad (7)$$

이 방정식으로부터 이론적으로 0의 Off 상태의 반

표 3. AE-SEED의 성능 평가

Table 3. Performance Estimation of the AE-SEED.

$N_{qw}$	Device Capacitance [fF]	$V_e = 0$ [V]				$V_e = -5$ [V]			
		$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	$CR$	$\eta_b$ [Mbps]	$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	$CR$	$\eta_b$ [Mbps]
16	10.5	2.85	13.12	1.74	294.0	-	-	-	-
18	9.4	2.38	12.91	1.96	311.0*	-	-	-	-
20	8.6	2.04	11.89	2.20	300.7	2.06	16.69	2.66	106.4
24	7.2	1.43	9.28	2.82	221.7	1.81	15.74	3.45	115.3*
28	6.3	1.13	6.22	3.66	146.8	1.68	13.52	3.96	112.3
32	5.5	1.05	3.71	5.26	95.6	1.56	11.40	4.90	105.1
36	4.8	0.89	1.99	17.51	49.8	1.44	9.21	6.74	90.9
40	4.4	0.54	0.69	5.27	11.8	1.56	6.39	6.34	78.3

사율을 얻기 위한  $N_{qw}$ 의 값을 구해낼 수 있다. 그러나 실질적인 관점에서 이 조건은 다양한 성능 제한 요소들에 의하여 변형되어질 수 있다. 그림 9(e)와 9(h)에 보여진 것처럼 이것은 AFP cavity 구조로부터 얻어진 CR 곡선상의 최대 피크의 제한으로 알 수 있다. 그림 10(c)는  $V_e = 0$  V에서  $N_{qw} = 18$ 을 가진 AE-SEED가  $P_a = 2.38$  mW,  $\Delta R = 12.91$  %,  $CR = 1.96$ 에서 311 Mbps의 최대 비트 레이트를,  $V_e = -5$  V에서  $N_{qw} = 24$  인 AE-SEED가  $P_a = 1.81$  mW,  $\Delta R = 15.74$  %,  $CR = 3.45$ 에서 115 Mbps의 최대 비트 레이트를 가짐을 보여준다. 이와 같이 다른 소자들에 비하여 AE-SEED의 두드러진 비트 레이트 성능은 주로 높은 전계 흡수 그리고 상대적으로 작은 소자 커패시턴스에 기인한 것으로 해석할 수 있다. AE-SEED는 -5 V 바이어스 조건보다 0 V 바이어스 조건하에서 더 좋은 비트 레이트 성능을 보인다.

4. BBAE-SEED

BBAE-SEED의 기본적인 구조는 그림 1(d)에 보여진다. BBAE-SEED는 BBE-SEED와 AE-SEED의 유리한 특성들이 결합된 구조로써 여기자 포화에 기인한  $R_{off}$ 의 증가는 높은 전기장 세기 때문에 상대적으로 작다. 반면에 ohmic heating에 기인한  $R_{on}$ 의 감소는 AE-SEED의 경우에서처럼 큰 특성을 보인다.  $N_{qw} = 40$ 인 BBAE-SEED의 BVP는  $V_e = 0$  V, -5 V에서 각각 1.91 mW, 3.18 mW이고 BBAE-SEED의  $P_a$ 도 역시  $N_{qw}$ 의 증가에 따라 감소한다(표 IV). 그림 9(g)와 9(h)는  $V_e = 0$  V에서 최대의 CR값이 1.71 mW의 대응하는  $P_a$ ,  $N_{qw} = 38$ 에 대하여 112.86의 값을 가지는 반면  $\Delta R$ 은 단순히  $N_{qw}$ 의 증가에 따라 감소됨을 보인다. 그림 10(d)에 보인 것처럼  $V_e = 0$  V에서  $N_{qw} = 28$ 의 BBAE-SEED는  $P_a = 2.93$  mW,  $\Delta R = 10.27$  %,  $CR = 4.44$ 에서 156 Mbps의 최대 비트 레이트를 가지며  $V_e = -5$  V에서는  $N_{qw} = 40$ 일 때  $P_a = 1.47$  mW,  $\Delta R = 8.41$  %,  $CR = 59.01$ 에서 26 Mbps의 최대 비트 레이트를 갖는다. 이들 결과들은 AE-SEED에 비하여 매우 낮은 비트 레이트 성능을 보이는데 이는 두 가지의 주요한 원인으로 분석되어질 수 있다. 첫 째로 BBAE-SEED의 커패시턴스는 AE-SEED의 4 배이고 두 번째로 높은 전계 흡수를 가진 AFP cavity 구조에 있어서 높은 전기장에 의한 전계 흡수 변조는 AR-coated 구조

에 비하여 의미있는 변화를 보여주지 못하다는 것이다. 결국 BBAE-SEED는 비트 레이트 관점에서 AE-SEED보다 나은 성능을 보여주지 못한다.

표 4. BBAE-SEED의 성능 평가  
Table 4. Performance Estimation of the BBAE-SEED.

$N_{qw}$	Device Capacitance [fF]	$V_e = 0$ [V]			
		$P_a$ [mW]	$\Delta R$ [%]	CR	$\eta_b$ [Mbps]
26	25.5	-	-	-	152.2
28	23.8	2.93	10.27	4.44	155.9*
30	22.3	2.70	9.66	5.58	146.4
32	20.9	2.39	8.98	8.82	131.1
34	19.8	2.23	7.97	16.82	116.6
36	18.8	2.02	6.71	75.16	94.6
38	18.0	1.71	5.47	112.86	69.5
40	17.0	1.39	4.30	26.81	47.4

VI. 결 론

본 논문에서는 직렬 광 스위칭 시스템에서 네 가지의 ESQW S-SEED의 성능상에 높은 입사 광 전력의 영향을 조사하였다. 높은 입사 광 전력 하에서 ohmic heating 과 여기자 포화 현상은  $\Delta R$ ,  $CR$ , 그리고 시스템 비트 레이트와 같은 소자의 성능을 저하시킨다. 동일한 수의 ESQW에 대하여 AFP cavity 구조는 상대적으로 큰 전계 흡수 효과 때문에 AR-coated 구조에 비하여 ohmic heating의 영향을 크게 받는다. 반면에 BBE-SEED는 동일 바이어스 하에서 E-SEED에 비하여 소자를 가로질러 두 배 더 큰 전기장을 유도할 수 있으므로 상대적으로 작은 여기자 포화의 영향을 받는다. 결과적으로 제시된 네 가지의 ESQW S-SEED중에서 BBE-SEED는 높은 입사 광 전력 동작에 있어서 바람직한 특성을 보인다. 또한 소자의 성능 분석을 위하여  $P_a$ 하의 시스템 비트 레이트를 계산했다. 일반적으로 AFP-cavity 구조는 AR-coated 구조에 비하여 더 좋은 비트 레이트 성능을 보인다. BBE-SEED의 상대적으로 큰 소자 커패시턴스는 이 소자의 다른 이점에도 불구하고 비트 레이트 성능의 감소를 이끈다. AE-SEED는 고려중인 4 가지의 S-SEED 중에서 가장 좋은 비트 레이트 성

능을 보인다( $V_e = 0$  V,  $N_{qw} = 18$ 에서 311 Mbps). 그러나 BBAE-SEED 는 AE-SEED에 비하여 어떤 성능 상의 향상도 보이지 않는다.

#### 참 고 문 헌

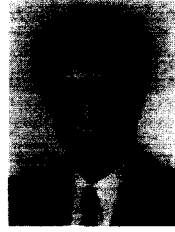
- [ 1 ] K. W. Goossen, L. M. F. Chirovsky, R. A. Morgan, J. E. Cunningham, and W. Y. Jan, High power extremely shallow quantum well modulator, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 3, pp. 448-450, 1991.
- [ 2 ] Y. W. Choi, O. K. Kwon, and E. H. Lee, Improved performances of a S-SEED using extremely shallow quantum wells and asymmetric Fabry-Perot cavity structure, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 1406-1408, 1993.
- [ 3 ] Y. W. Choi, O. K. Kwon, J. H. Baek, B. Lee, E. H. Lee, Nonbiased optical bistable Device in an impedance-mismatched asymmetric Fabry-Perot structure, *IEE Electronics Lett.*, vol. 30, pp. 1973-1974, 1994.
- [ 4 ] Y. W. Choi, Analysis of switching dynamics of asymmetric Fabry-Perot symmetric self-electro-optic effect devices with extremely shallow quantum wells, *J. Appl. Phys.*, vol. 82, pp. 1936-1946, 1997.
- [ 5 ] O. K. Kwon, K. Kim, K. S. Hyun, Y. W. Choi, E. H. Lee, X. B. Mei, and C. W. Tu, A novel all-optical bistable device in a noninterferometric double p-i(ESQWs)-n diode structure, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, pp. 224-226, 1996.
- [ 6 ] O. K. Kwon, K. Kim, K. S. Hyun, J. H. Baek, B. Lee, E. H. Lee, Large non-biased all-optical bistability in an electroabsorption modulator using p-i-n-i-p diode and asymmetric Fabry-Perot cavity structure, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, pp. 3216-3217, 1996.
- [ 7 ] O.-K. Kwon, K.-S. Lee, Y.-S. Lim, E.-H. Lee, and B.-T. Ahn, High-power operation of non-biased optical bistable devices using multiple quantum well pinip-diodes, *extended abstracts of the 1997 International Conf. on Solid state Devices and Materials*, Hamamatsu, pp. 180-181, 1997
- [ 8 ] D. A. B. Miller et al., Quantum well self-electrooptic effect device, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 21, pp. 135-148, 1985.
- [ 9 ] R. A. Morgan, M. T. Asom, L. M. F. Chirovsky, M. W. Focht, K. G. Glogovsky, G. D. Guth, G. J. Przybylek, L. E. Smith, and K. W. Goossen, Low voltage, high saturation, optically bistable self-electro-optic effect devices using extremely shallow quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, pp. 1049-1051, 1991.
- [ 10 ] K. W. Goossen, J. E. Cunningham, and W. Y. Jan, Excitonic electroabsorption in extremely shallow quantum wells, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 2582-2584, 1990.
- [ 11 ] O. K. Kwon, Y. W. Choi, K. Kim, and E. H. Lee, High power performance limitation of an ESQW SEED in an AFP etalon structure, *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 7, pp. 50-52, 1995.
- [ 12 ] T. Sizer, R. E. LaMarche, and T. K. Woodward, Point source heating effects in multiple quantum well modulators, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 420-422, 1992.
- [ 13 ] M. Whitehead, G. Parry, High contrast reflection modulation at normal incidence in asymmetric multiple quantum well Fabry-Perot structure, *Electronics Lett.*, vol. 25, pp. 566-568, 1989.
- [ 14 ] Anthony L. Lentine, David A. B. Miller, Leo M. F. Chirovsky, and L. Arthur DAsaro, Optimization of absorption in symmetric self - electrooptic effect devices: a systems perspective, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 2431-2439, 1991.
- [ 15 ] Anthony L. Lentine and Frank A. P. Tooley, Relationships between speed and tolerances for self-electro-optic-effect devices, *Applied Optics*, vol. 33, pp. 1354-1367, 1994.

## 저 자 소 개



林 延 燮(正會員)

1968년 7월 8일생. 1997년 중앙대학교 전자공학과(공학사). 1999년 중앙대학교 전자공학과(공학석사). 1999년 ~ 현재 현대전자 시스템 IC 연구소 연구원. 주관심분야는 광통신, 광 스위칭 시스템 및 소자



崔 永 完(正會員)

1962년 5월 30일생. 1985년 서강대학교 전자공학과(공학사). 1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사). 1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사). 1992년 ~ 1995년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원. 1995년 ~ 현재 중앙대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야는 광전자, 광통신, 병렬 광 접속, Microwave-Photonics, Optical CDMA