

論文2002-39SD-3-5

1.55 μm 진행파형 CPW InGaAsP Photodetector (Traveling-wave type CPW InGaAsP Photodetector at 1.55 μm)

尹榮高*, 姜泰球*, 李政勳*, 玉成海*, 孔淳哲*, 崔永完*

(Young-Seol Yun, Tae-Ku Kang, Jung-Hoon Lee, Sun-Cheol Kong,
and Young-Wan Choi)

요 약

진행파형 광 검출기의 대역폭 제한 요소로 천이시간(transit time), 광파와 마이크로파 사이의 속도 부정합, 광 흡수계수, impedance 매칭, 분산(dispersion), 마이크로파 손실 등과 같은 요소들 사이의 복합적인 영향에 의해 결정되어진다. 본 논문에서는 기존에 제시된 바 있는 속도 부정합 임펄스 응답에 천이시간을 고려하여 새로이 진행파형 광 검출기에서의 임펄스 응답을 제시하였다. 이 임펄스 응답을 이용하여 1.55 μm 진행파형 CPW 광 검출기에서 천이시간, 광파 마이크로파 사이의 속도 부정합, 그리고 광 구속인자가 소자의 대역폭에 미치는 영향에 대하여 분석하였고, 정확한 계산을 위해 마이크로파의 위상속도는 3차원 FDTD 를 이용하여 계산했다. 대역폭 개선을 위해 진성 흡수영역의 두께를 줄여가며 그 영향을 살펴보고, $\alpha=0.2 \mu\text{m}^{-1}$ 인 경우 천이시간과 광 구속인자의 영향에 의해 결정되는 최적의 진성 영역 두께는 0.2 μm 가 되는 것을 본 논문에서 제시한다.

Abstract

The bandwidth limitation of traveling-wave electroabsorption modulator(TW-EAM) is determined by the transit time, the velocity-mismatch between optical-wave and microwave, the impedance-matching, the dispersion and the microwave loss. In this paper, we introduce an novel impulse response of TW-EAM considering transit time as well as velocity-mismatch. We analyze the effect of transit-time and velocity-mismatch at the same time, using the FDTD method. We investigate the modulation bandwidth by changing the depth of the intrinsic region. We suggest that the optimum depth of the intrinsic region is 0.2 μm when the absorption coefficient(α) is 0.2 μm^{-1} .

Key Words : TW-EAM, Modulator, FDTD, transit-time

1. 서 론

Microwave-photonics(MWP) 시스템은 아날로그 fiber-optic links, 케이블 TV, 광케이블 백본(backbone) 기반의 무선 케이블, 통신 시스템, 초고속 안테나

remote 등과 같은 분야에서 광범위한 응용을 갖는다. 소형화된 초고속 고효율 광 검출기는 MWP 시스템 구현을 위해 반드시 극복되어야 하는 매우 중요한 기술이다. 이러한 요구를 충족하는 검출기로 진행파형 광 검출기(traveling-wave photodetector, TWPD)를 들 수 있다^[1~5].

진행파형 광 검출기는 전기적으로 분포된 구조이기 때문에, 대역폭이 RC 시정수에 의해 제한되기보다는 광 흡수계수와 광파의 그룹속도와 마이크로파 위상속도 사이의 속도 차에 의해 제한된다. 속도 부정합에 의한 대역폭 제한은 소자의 길이와는 무관하기 때문에

* 正會員, 中央大學校 光電子 및 光通信 研究室
(Optoelectronics and Optical Communication Lab.,
Chung-Ang Univ.)

接受日字:2001年11月16日, 수정완료일:2002年2月7日

소자의 대역폭을 훼손하지 않고 길이를 충분히 하여 소자의 효율을 높일 수 있다^[1-5]. 그러나 도파로형 광 검출기(waveguide PD, WGPD)나 수직입사형 광 검출기(vertically illuminated PD, VPD)와 같은 기존의 Lump형 광 검출기는 RC 시정수에 의해 대역폭이 제한된다. 그렇기 때문에 효율을 높이기 위해 소자의 길이를 길게 할 경우 그만큼의 대역폭의 제한을 감수해야만 한다. 이런 이유로 Lump형 광 검출기는 대역폭-효율 곱(bandwidth-efficiency product)에 있어서 진행파형 광 검출기에 비해 그 성능이 크게 떨어진다. 이러한 사실은 이미 Kirk S. Giboney가 동일 웨이퍼 상에 진행파형 광 검출기, WGPD, VPD를 실제로 실험 제작하여 진행파형 광 검출기가 더 큰 대역폭-효율 곱을 가짐을 보였다^[4].

진행파형 광 검출기의 대역폭은 천이시간(carrier transit time), 광파와 마이크로파 사이의 속도 부정합, impedance 매칭, 광 흡수계수, 분산(dispersion), 마이크로파 손실 등과 같은 요소들의 복합적인 영향에 의해 결정된다. 광파와 마이크로파 사이의 속도 부정합이 대역폭 제한의 주된 원인으로 여겨지고 있고, 이에 대한 영향은 속도 부정합 임펄스 응답(velocity-mismatch impulse response)을 제시하여 고려되었다^[1,6]. 이와 관련하여 속도 부정합을 개선하기 위한 구조로 주기적인 TWPD 혹은 속도 정합 분포 광 검출기(Velocity-Matched Distributed Photodetector, VMDP)가 제시되었으나^[2,5], TWPD의 대역폭에 상당한 제한 요소로 예상되는 천이시간에 대한 구체적인 고려는 아직까지 이루어지지 않았다. 속도 정합의 개선을 위해 진성 영역 두께를 1 μm 로 하고 표류 포화속도가 10⁷cm/s인 경우, 천이시간에 의한 대역폭은 대략 100GHz 이하로 속도 부정합에 의해서 나타나는 수백 GHz 정도의 대역폭과 비교하면 상당히 제한된다. 따라서 천이시간에 대한 구체적인 고려는 반드시 이루어져야 한다. 천이시간은 진성 영역(intrinsic region)의 두께와 전자와 정공의 이동속도에 의해 결정되며, 진성 영역의 두께에 반비례한다. 반면 소자의 전송라인을 따라 진행되는 마이크로파의 위상속도는 대략 $1/\sqrt{LC}$ 이고, 진성 영역 두께의 제곱근에 비례한다. 천이시간과 속도 부정합 모두 진성 영역의 두께에 의해 영향을 받고, 진성 영역의 두께에 대해 서로 tradeoff 관계에 있기 때문에, 이 두 요소는 동시에 고려되어야 한다.

본 논문에서는 기존에 제시된 속도 부정합 임펄스 응답에 천이시간을 고려한 임펄스 응답을 새로이 제시하였다. 제시된 임펄스 응답은 광 도파로 해석을 통해 도파로 내의 광 에너지의 분포를 구한 후, 진성 영역의 분할을 통해 천이시간을 구체적으로 고려하였다. 광 검출기내에서 진행되는 마이크로파의 속도는 정확한 계산을 위해 3차원 유한 차분 시간 영역 법(finite difference time domain method, FDTD)을 이용하여 구하였다^[7-9]. FDTD 알고리즘은 미분형 Maxwell 방정식을 시간과 공간 영역에 이산화 시키는 근사 방법으로 full-wave 해석이 가능하다. Full-wave 해석은 표면파 효과, 복사 파, 외부 소자와 결합효과를 계산할 수 있으며 임의의 소자 형태, 다양한 급전 구조, 다층 구조, 비등방성 유전체의 경우에도 해석이 가능하다.

II. 이 론

1. 속도 부정합 임펄스 응답

기존의 발표된 진행파형 광 검출기의 속도 부정합 임펄스 응답은 광 흡수계수와 광파의 그룹속도와 마이크로파의 위상속도 사이의 속도 차에 의해서 결정된다. 시간 $t=0$ 일 때, 입사된 광 임펄스에 대한 속도 부정합 임펄스 응답은 다음 식(1)과 같다^[1,2].

$$i(l, t) = \frac{\eta_i q}{h\nu} E_0 \left\{ \frac{\Gamma\alpha}{2} \frac{v_o v_e}{v_o - v_e} \exp \left[\Gamma\alpha \frac{v_o v_e}{v_o - v_e} \left(t - \frac{l}{v_e} \right) \right] \cdot u \left[\frac{l}{v_e} - t \right] + \gamma \frac{\Gamma\alpha}{2} \frac{v_o v_e}{v_o + v_e} \exp \left[-\Gamma\alpha \frac{v_o v_e}{v_o + v_e} \left(t - \frac{l}{v_e} \right) \right] \cdot u \left[t - \frac{l}{v_e} \right] \right\},$$

$$\text{for } \frac{l}{v_o} \leq t \leq \frac{l}{v_o} + 2\frac{l}{v_e}. \quad (1)$$

여기서 η_i 는 내부 양자 효율(internal quantum efficiency), Γ 는 광 구속인자(optical confinement factor), α 는 광 흡수계수(optical absorption coefficient), E_0 는 광 임펄스의 총 에너지, γ 는 입력 단에서의 반사계수, v_o, v_e 는 각각 광파와 마이크로파의 진행 속도, u 는 단위 함수(unit function)를 나타낸다.

속도 부정합 임펄스 응답에 대한 주파수 특성은 식 (1)의 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 다음 식 (2)와 같은 속도 부정합 주파수 응답을 얻을 수 있다.

$$\frac{i(\omega)}{Q} \sqrt{2\pi} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{w_f}{w_f - j\omega} + \gamma \frac{w_r}{w_r + j\omega} e^{-j\omega \frac{l}{v_w}} \right) - \left(\frac{w_f}{w_f - j\omega} e^{-j\omega \frac{l}{v_o}} + \gamma \frac{w_r}{w_r + j\omega} e^{-j\omega \left(\frac{l}{v_o} + \frac{2l}{v_e} \right)} \right) e^{-\Gamma \alpha l} \right\} \quad (2)$$

여기서 $Q = E_0 \eta_i q / h\nu$, $w_f = \Gamma \alpha v_e / (1 - v_e / v_o)$, $w_r = \Gamma \alpha v_e / (1 + v_e / v_o)$ 이다.

일반적으로 진행파형 광 검출기는 충분한 광 에너지의 흡수를 위해서 소자의 길이를 충분히 길게 ($\Gamma \alpha \gg 1$) 하며, $e^{-\Gamma \alpha l} \cong 0$ 이 되어 식(2)에서 두 번째 항이 무시되고, 다음 식(3)과 같이 줄어들게 된다^[2].

$$\frac{i(\omega)}{Q} \sqrt{2\pi} = \frac{1}{2} \left(\frac{w_f}{w_f - j\omega} + \gamma \frac{w_r}{w_r + j\omega} \right) e^{-j\omega \frac{l}{v_w}} \quad (3)$$

2. 천이시간을 고려한 속도 부정합 임펄스 응답
 진행파형 광 검출기는 광 에너지를 흡수하여 전기신호로 변환해 주는 p-i-n 다이오드와 발생된 전기신호의 진행을 위한 전송라인으로 구성되어 있다. p-i-n 다이오드의 진성 영역에서 광 에너지의 흡수로 발생된 carrier는 전계(electric field)에 의해 진성 영역을 포류한다. 이런 천이시간은 소자의 대역폭을 상당히 제한하기 때문에 천이시간에 대한 구체적인 고려가 반드시 이루어져야 한다. 진성 영역에서 발생하는 carrier의 수는 광 에너지의 세기에 비례하기 때문에, 진성 영역내의 광 에너지의 분포를 안다면 발생된 carrier의 수를 알 수 있다. 진성 영역에서의 광 에너지 분포는 광 도파로 해석^[10]을 통해 구할 수 있다. 천이시간의 구체적 고려를 위해 그림 1과 같이 진성 흡수영역을 N개로 분할하였다. 각 분할영역 내의 광 에너지는 광 도파로 해석을 통해 얻어진 필드의 포인팅 벡터를 각 분할영역에 대해 적분하여 구할 수 있고, 이 적분값을 갖는 광 에너지로부터 각 분할영역 내에서 발생하는 전송자의 수를 알 수 있다. 간단한 해석을 위해, 각 분할영역 내의 전송자는 각 분할영역의 중간위치에서 포류하고, 진성 영역내에서 발생된 전송자는 도핑영역까지 포화속도(saturation velocity)로 포류할만한 정도의 충분한 역방향 바이어스 전압이 걸렸다고 가정하였다.

천이 시간을 고려한 속도 부정합 임펄스 응답은 다음 식(4)와 같다.

$$i_{total}(l, t) = \sum_{n=1}^N I_n \text{Current}_n(l, t) \quad (4)$$

$$\text{Current}_n(l, t) = \frac{n_i q}{h\nu} E_0 \left\{ \frac{\Gamma \alpha}{2} \frac{v_o v_e t}{v_o t - v_e(t - \tau_n)} \exp \left[\Gamma \alpha \frac{v_o v_e t}{v_o t - v_e(t - \tau_n)} \left(t - \tau_n - \frac{l}{v_e} \right) \right] \cdot u \left[\frac{l}{v_e} - t + \tau_n \right] + \gamma \frac{\Gamma \alpha}{2} \frac{v_o v_e t}{v_o t + v_e(t - \tau_n)} \exp \left[-\Gamma \alpha \frac{v_o v_e t}{v_o t + v_e(t - \tau_n)} \left(t - \tau_n - \frac{l}{v_e} \right) \right] \cdot u \left[t - \tau_n - \frac{l}{v_e} \right] \right\}$$

for $\frac{l}{v_o} + \tau_n \leq t \leq \frac{l}{v_o} + 2\frac{l}{v_e} + \tau_n$. (5)

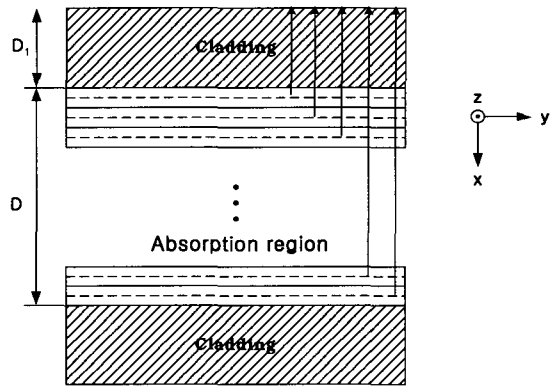


그림 1. 천이시간을 고려하기 위한 진성 영역 분할 모델
 Fig. 1. Fractional model of an intrinsic region to consider transit-time.

여기서 $\tau_n = (2n - 1)\tau / 2 + D_1 / V_{sat}$, $\tau = D / N V_{sat}$, N 은 진성흡수 영역을 분할할 수, D 는 진성흡수 영역의 두께, D_1 은 클래딩 영역의 두께, V_{sat} 은 포화속도, I_n 은 n 번째 분할영역의 정규화된 광 에너지를 나타낸다. 천이시간을 고려한 속도 부정합 임펄스 응답에 대한 주파수 응답은 식(3)처럼 푸리에 변환을 통해 정형화된 식을 얻을 수 없기 때문에 식(4)를 이용하여 얻어진 결과의 FFT를 통해 얻었다.

III. 결과 및 토론

본 논문에서는 3차원 FDTD를 이용하여 진행파형 광 검출기를 진행하는 마이크로파의 위상속도 계산을 수행하였다. 분석된 구조는 그림 2에서 보인 바와 같고, 전극은 두께가 0인 완전도체로 가정하였다. 각 격자는 Δx , Δy , Δz , Δt 로 분할하고 각각 $0.3 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, 0.1

μm , 0.2fs로 하였고, 자유공간과 같은 무한 영역 (unbounded problem)의 해석을 위하여 가상적인 경계 조건으로 경계에서 발생하는 물리적인 반사를 없애고 전파가 진행 방향으로 전파되도록 하는 Mur의 1차 흡수 경계 조건(absorbing boundary condition, ABC)을 이용하였다. n+층의 전도도는 도핑 수준 10^{19}cm^{-3} 에 해당하는 $1800 [1/\text{ohm cm}]$, n층은 10^{18}cm^{-3} 에 해당하는 $240 [1/\text{ohm cm}]$, p층은 $5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 에 대응하는 $1.98 [1/\text{ohm cm}]$, 그리고 p+층은 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ 의 도핑 수준에 대응하는 $200 [1/\text{ohm cm}]$ 의 전도도 값을 가진다.

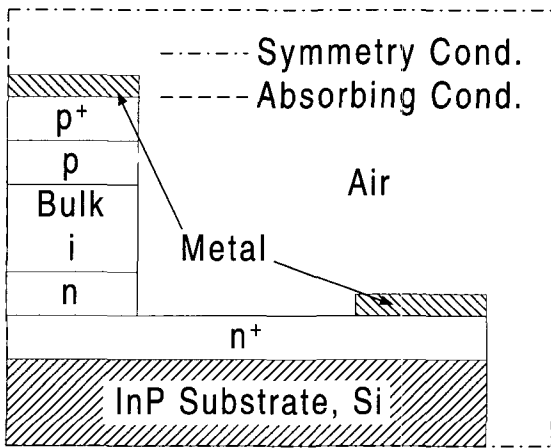


그림 2. FDTD 분석을 위한 진행파형 CPW 광 검출기의 구조
Fig. 2. TWPDP structure for FDTD analysis.

그림 3은 식(1), (4)를 이용하여 얻어진 임펄스 응답들이다. 이 구조에 대한 모의 실험 조건은 다음과 같다. 흡수 영역인 InGaAsP($\lambda_g = 1.485\mu\text{m}$)의 두께 D는 $0.4\mu\text{m}$, 클래딩 영역인 InGaAsP(1.3Q)의 두께 D1은 $0.3\mu\text{m}$, $\eta_i = 1, E_0 = 1, \Gamma\alpha = 0.025\mu\text{m}^{-1}, V_{\text{sat}} = 10^7\text{cm/s}, N = 500, L = 200\mu\text{m}$ 로 하였다. 이 구조에 대한 광 유효 굴절 계수는 3.43으로 effective index method(EIM)[10]을 이용해 구하였다. 3차원 FDTD 알고리즘을 이용하여 계산된 마이크로파의 유효굴절 계수는 4.07이고, 속도 정합은 0.843이다. 그림 3에서 천이시간의 고려한 경우는 단순히 속도 부정합만을 고려한 경우에 비해 임펄스의 폭은 더욱 넓어짐을 관찰할 수 있다. 입력단을 open termination($\gamma = 1$)하여 backward로 진행하는 마이크로파까지 모두 출력으로 받아들이기 때문에 효율은 100%이고, 식(1)과 (4)에 의해 얻어진 임펄스 응

답들에 대한 대역폭은 각각 205GHz, 117.2GHz이다. 대역폭 차는 88GHz로 천이시간이 대역폭에 미치는 영향은 상당하다. 따라서 정확한 소자 성능 분석을 위해서는 속도 부정합에 대한 고려뿐만 아니라, 천이시간에 대한 자세한 고려가 필요하다는 것을 보여주는 결과이다.

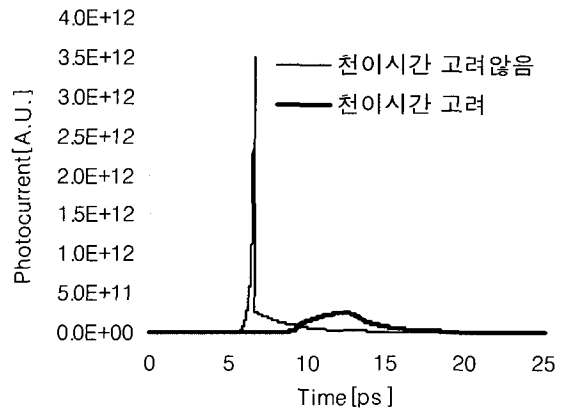


그림 3. 속도 부정합 임펄스 응답과 새로이 제시된 속도 부정합 임펄스 응답의 비교($\gamma = 1$).
Fig. 3. Comparison of the impulse response by velocity mismatch, with and without considering transit-time.

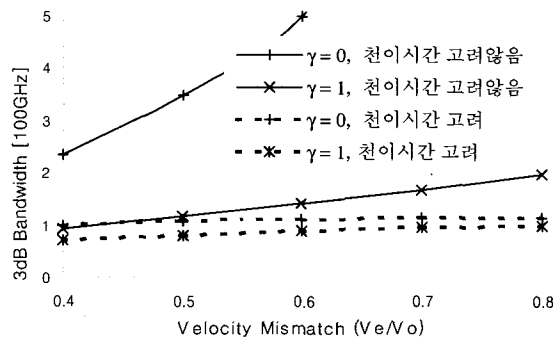


그림 4. 속도 정합에 따른 $\gamma = 0$ 와 $\gamma = 1$ 에 대한 3dB 대역폭, 실선: 천이시간을 고려하지 않은 경우, 점선: 천이시간을 고려한 경우
Fig. 4. 3dB bandwidth for velocity mismatch at $\gamma = 0$ and $\gamma = 1$ solid line : without considering transit time dotted line : with considering transit time.

그림 4는 위와 동일한 조건에서 마이크로파의 속도 (즉, 속도 정합 정도)를 0.4에서 0.8까지 임의적으로 변화시키며, 그에 따른 대역폭 변화를 나타낸 것이다. $\gamma = 1$ 인 경우에 속도 정합이 0.4에서 0.8로 개선되었을 때 천이시간의 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에

대한 대역폭의 변화는 각각 104.5 GHz, 27.3 GHz이다. 천이시간에 의한 대역폭 제한이 주도적으로 나타나기 때문에, 속도 부정합에 의한 대역폭 변화는 속도 부정합만을 고려한 경우에 비해 그다지 크지 않음을 알 수 있다. 천이시간을 고려한 응답에 대해서 입력 단의 매칭 여부에 따른 소자의 성능을 살펴보면, 속도정합이 0.8이고 $\gamma = 1$ 이면 그 대역폭은 98.6GHz 이고, $\gamma = 0$ 이면 115.4GHz이다. $\gamma = 0, \gamma = 1$ 의 효율은 각각 50%, 100%로 $\gamma = 1$ 일 때 $\gamma = 0$ 에 비해 그 효율이 2배이므로, 더 큰 대역폭-효율 곱은 입력단을 open termination 함으로써 얻을 수 있다.

이미 살펴본 바와 같이 천이시간에 의한 대역폭 제한은 속도 부정합에 의한 영향보다 크기 때문에, 대역폭 개선을 위해 진성 흡수영역의 두께를 얇게 하여 천이시간을 줄여야 한다. 그러나 진성 흡수영역이 얇아지면, 천이시간에 의한 대역폭 제한 영향은 감소하지만, 속도 정합의 훼손과 광 구속인자의 감소로 이 두 요소에 의한 제한 영향은 증가하게 된다. 결국, 이 세 요소의 복합적인 영향에 의해서 적절한 진성 흡수영역의 두께가 결정되어진다.

그림 5(a)는 진성 흡수영역의 두께에 따른 광 유효 굴절계수와 마이크로파의 유효 굴절계수를 나타낸다. 여기서 광 유효 굴절계수는 EIM을 사용하여 구했고, 마이크로파의 유효 굴절계수는 3차원 FDTD 알고리즘을 사용하여 구했다. 천이시간은 진성 흡수영역의 두께에 비례하기 때문에 그 두께가 $0.4\mu\text{m}$ 에서 $0.1\mu\text{m}$ 로 얇아지게 되면 대략 1/4로 감소하고, 속도 정합은 캐패시터 성분의 감소로 그림 5(a)에 나타난 것처럼 대략 0.1 정도의 개선을 보인다. 그러므로 천이시간과 속도 부정합 영향만을 고려한다면, 천이시간의 감소로 대역폭은 개선되어야 한다. 그러나 그림 5(b)에 나타난 것처럼 두께가 $0.4\mu\text{m}$ 에서 $0.1\mu\text{m}$ 로 얇아지면 광 구속인자는 대략 1/8로 감소하게 되는데, 이것은 $\Gamma\alpha$ 값의 상당한 감소를 가져와 대역폭 제한하게 된다.

그림 5(c)는 진성 흡수영역 두께 변화에 따른 대역폭을 나타낸 것으로 광 흡수계수, α 는 $0.02\mu\text{m}^{-1}$ 로 하였다. 예상한 것과는 달리 천이시간의 감소로 인한 대역폭 개선은 보이지 않고, 오히려 대역폭은 점점 나빠짐을 관찰할 수 있다. 이것은 천이시간에 의한 대역폭 제한이 주도적으로 나타나기보다는 작은 α 값으로 인해서 광 구속인자에 의한 대역폭 제한이 주도적으로 나타나기 때문이다. α 값이 작으면 광 발생된 캐리어들은

소자의 길이 방향으로 긴 영역에 걸쳐서 분포하게 되어 넓은 폭의 출력 임펄스를 갖게된다. 또한, 작은 α 값은 충분한 광파의 흡수를 위해서 소자의 길이를 길게 해야하고, 긴 소자의 길이는 마이크로파 손실에 의한 대역폭이 제한을 가져온다. 그러므로 우선적으로 큰 α 값이 요구된다.

그림 5(d)는 α 값을 $0.2\mu\text{m}^{-1}$ 일 때 진성 흡수영역의 두께 변화에 따른 대역폭을 나타낸 것이다. 입력단을 open termination 하였을 때 진성 흡수영역의 두께 변화에 따른 대역폭 변화를 살펴보면, 두께가 대략 $0.2\mu\text{m}$ 정도까지는 두께가 얇아질수록 대역폭은 향상되고, $0.2\mu\text{m}$ 보다 더 얇아지게 되면 대역폭의 향상은 보이지 않고, 오히려 훼손된다. $0.2\mu\text{m}$ 까지는 천이시간에 의한 대역폭 제한이 주도적으로 나타나기 때문에 두께가 얇아질수록 천이시간의 감소로 대역폭이 개선되고, $0.2\mu\text{m}$ 보다 더 얇아지게 되면 광 구속인자가 상당히 작은 값을 갖게 되어, 천이시간에 의한 대역폭 개선보다 작은 $\Gamma\alpha$ 값으로 인해 발생하는 대역폭 제한이 더 커지게 되고, 전체 대역폭은 감소하게 된다.

입력단을 매칭 termination 한 경우에는 $\gamma = 1$ 인 경우에 비해 광 구속인자가 대역폭에 미치는 영향이 1/2이기 때문에, $\gamma = 1$ 경우와 달리 $0.2\mu\text{m}$ 보다 더 얇아져도 광 구속인자의 감소로 인한 대역폭 제한이 천이시간의 감소로 인한 대역폭 개선정도보다 크지 않기 때문에 진성 흡수영역의 두께가 얇아질수록 전체 대역폭은 지속적인 향상을 보인다. 소자의 성능은 대역폭-효율 곱으로 나타내므로 이것을 살펴보면, 진성 흡수영역의 두께가 대략 $0.2\mu\text{m}$ 일 때까지는 입력단을 open termination 한 경우가 매칭 termination한 경우보다 더 큰 대역폭-효율 곱을 갖고, $0.2\mu\text{m}$ 보다 더 얇아지게 되면, 매칭 termination한 경우가 더 큰 대역폭-효율 곱을 갖는다. 그러나 진성 흡수영역의 두께가 $0.1\mu\text{m}$ 일 때 그림 5(b) 값을 갖는다. 광 파의 커플링 손실을 고려해 볼 때 이 값은 적절치 못하고, $0.2\mu\text{m}$ 보다 얇은 경우에 대해서는 고려에서 제외된다. 그러므로 큰 대역폭-효율 곱을 얻기 위해서는 입력단을 open termination하여야 한다.

그림 6은 진성 흡수영역의 두께가 $0.2\mu\text{m}$ 이고 $\alpha=0.2\mu\text{m}^{-1}$ 일 때, 속도 정합에 따른 대역폭을 도시한 것이다. 마이크로파의 위상속도(혹은 속도 부정합)는 진성 영역의 두께 외에도 신호 전극과 접지전극 사이의 간격, 소자의 폭 등 구조적인 파라미터에 의해 결정된다. 진성 흡수영역 이외의 소자의 구조를 조정하면 천이시간이

나 광 구속인자는 고정되므로, 속도정합에 따른 대역폭 제한만이 나타나게 된다. 그림 6에서 나타난 것처럼 속도 정합에 따른 대역폭 변화는 상당하므로, 대역폭 개선을 위해서는 진성 흡수영역의 적절한 두께 선정 외에도 속도 정합의 향상을 위해 소자의 폭, 전극사이의 간격 등에 대한 최적화 설계가 요구된다. 3차원 FDTD

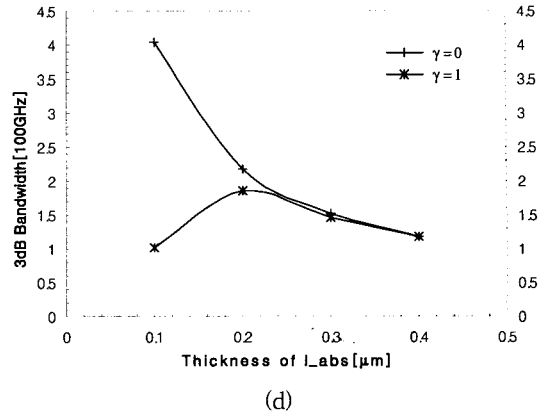
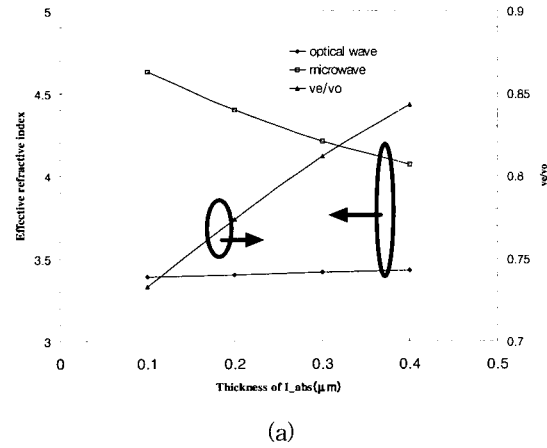
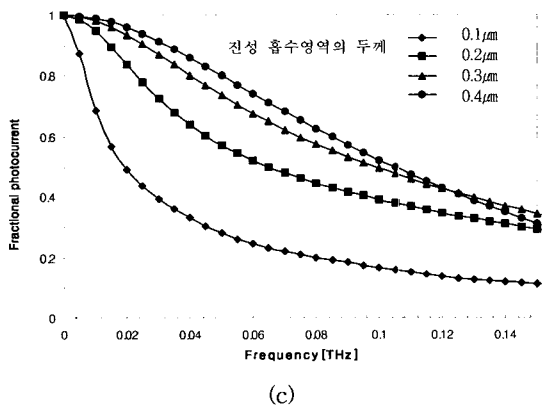
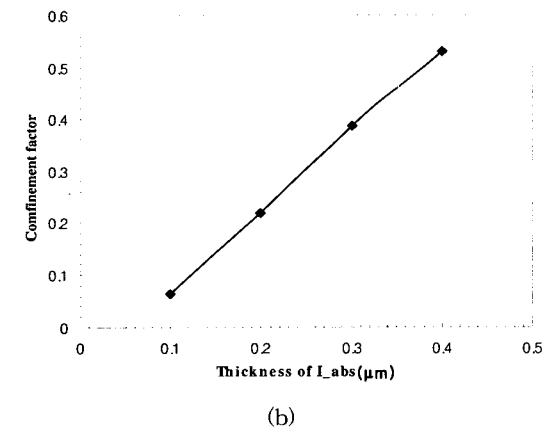


그림 5. 진성 흡수영역의 두께 변화에 따른 유효굴절계수, 광 구속인자, 대역폭
 (a) 광 유효 굴절계수와 마이크로파의 유효 굴절계수
 (b) 진성 흡수영역의 두께에 따른 광 구속인자
 (c) 진성 흡수영역의 두께에 따른 주파수 응답 광 흡수계수 ($\alpha=0.02 \mu\text{m}^{-1}$)
 (d) 진성 흡수영역의 두께에 따른 대역폭 ($\alpha=0.2 \mu\text{m}^{-1}$)

Fig. 5. Characteristics of TWPD for the thickness of an intrinsic region.
 (a) Optical and microwave effective refractive index
 (b) Optical confinement factor
 (c) Fraction photocurrent
 (d) 3dB bandwidth



알고리즘을 이용하여 진행파형 ridge형 CPW 전계 흡수 전송라인 구조에 대해 분석된 결과에 따르면, 마이크로파의 전송 속도 개선을 위해서 소자의 폭은 가능하면 얇게 제작하여야 한다. 또한, 신호 전극과 접지 전극 사이의 간격은 너무 좁거나 넓어지게 되면 소자의 전송라인은 parallel plate 특성을 가지므로 더 빠른 마이크로파 전송 특성을 가지는 CPW 특성을 얻기 위해서는 적절한 간격의 선정이 필요하고, 제시된 적절한 간격은 $0.2\mu\text{m}$ 이다^[7]. 소자 폭은 광 커플링 손실을 고려하면 무한정 얇게 제작하는 것은 적당치 않으며 $0.2\mu\text{m} \sim 0.3\mu\text{m}$ 가 적절하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 진행파형 광 검출기의 대역폭 제한 요소들 중 상당한 제한 영향을 가지는 천이시간을 구체적으로 고려하였고, 이것은 광 도파로 해석과 진성

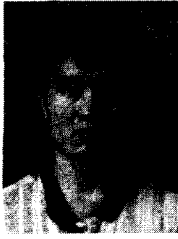
영역을 분할을 통해서 이루어졌다. 속도 부정합 임펄스 응답에 천이시간을 고려하여 새로운 부정합 임펄스 응답을 제시했고, 3차원 FDTD 알고리즘을 이용하여 마이크로파의 위상속도에 대한 정확한 계산을 수행했다. 제시된 임펄스 응답을 이용하여 천이시간, 속도 부정합, 광 구속인자 값이 대역폭에 미치는 영향을 조사하였다.

광 흡수계수 α 값에 의한 대역폭 제한이 주도적으로 나타나지 않을 정도의 큰 값을 갖는다면, 천이시간이 대역폭에 미치는 영향은 지배적임을 알았다. 따라서 대역폭 개선을 위해 진성 영역을 얇게 하여 천이시간을 줄여야한다. 그러나 진성 영역의 두께를 너무 얇게 하면, 천이시간의 감소에 의한 대역폭 개선 정도보다 광 구속인자의 감소로 인한 대역폭 제한이 주도적으로 나타나게 되어 전체적인 대역폭은 오히려 제한된다. 그러므로 진성 흡수영역의 두께에 대한 적절한 선정이 필요하며, $\alpha=0.2 \mu\text{m}^{-1}$ 일 때 적절한 진성 흡수영역의 두께는 $0.2 \mu\text{m}$ 이다. 대역폭-효율 곱에 있어서 $\gamma = 1$ 인 경우가 $\gamma = 0$ 인 경우에 비해 더 큰 값을 가지므로, 입력력은 open termination 하여야 해야한다. 진성 흡수영역의 두께의 적절한 선정이외에도 전송라인의 구조적 최적화를 통해 속도 정합의 개선을 시킬 수 있고, 이것은 소자의 대역폭 향상을 가져온다. 이와 관련하여 TWPD와 유사한 구조를 가지는 진행파형 전계 흡수 변조기의 마이크로파 특성에 대해 분석된 결과에 따르면 소자의 폭은 $0.3 \mu\text{m}$, 전극간의 간격은 $0.2 \mu\text{m}$ 이 적절하다.

참 고 문 헌

- [1] Kirk S. Giboney, M. J. W. Rodwell, and J. E. Bowes, "Traveling-wave photodetectors," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 4, pp. 1363~1365, 1992.
- [2] Kirk S. Giboney, M. J. W. Rodwell, and J. E. Bowers, "Traveling-wave photodetector theory," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 45, pp. 1310~1319, 1997.
- [3] V. M. Heitala and G. A. Vawter, T. M. Brennan, and B. E. Hammons, "Traveling-wave photodetectors for high-power, large bandwidth applications," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 43, pp. 2291~2298, 1995.
- [4] Kirk S. Giboney, R. Nagarajan, T. Reynolds, S. Allen, R. Mirin, M. Rodwell and J. E. Bowers, "Traveling-wave photodetectors with 172-GHz bandwidth and 76-GHz bandwidth-efficiency product," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, pp. 412~414, 1995.
- [5] L. Y. Lin, M. C. Wu, T. Itoh, T. Vang, R. E. Muller, D. L. Sivco, and A. Y. Cho, "High-power high-speed photodetectors Design, Analysis, and Experimental demonstration," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 45, pp. 1320~1331, 1997.
- [6] Kirk S. Giboney, Mark J. W. Rodwell, John E. Bowers, "Traveling-Wave Photodetector Design and Measurements," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 2, pp. 622~629, 1996.
- [7] S. J. Lee, S. C. Kong, J. H. Lee, and Y.W.Choi, "Microwave characteristics of Traveling-Wave MQW Electro-absorption Modulators using the FDTD and the Fourier transform," *SPIE Proceeding*, Jan., 2000.
- [8] S. C. Kong, J. H. Lee, S. J. Lee, and Y. W. Choi, "Analysis and design of traveling-wave photodetectors for RF optical link communication using the Finite Difference Time Domain method," *SPIE Poceeding*, Jan., 2000.
- [9] Guo-Chun Liang, Yao-Wu Liu, and Kenneth K. Mei, "Full-Wave Analysis of Coplanar Waveguide and Slotline Using the Time-Domain Finite-Difference Method," *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, Vol. 37, No. 12, pp. 1949~1957, Dec. 1989.
- [10] C. Pollock, *Fundamentals of optoelectronics*, pp. 49~74, Richard D. IRWIN, INC., 1995.

저 자 소 개



尹榮高(正會員)

1998년 2월 : 중앙대학교 전자공학과(공학사). 2000년 2월 : 중앙대학교 첨단영상대학원(공학석사). 2001년 3월~ : 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정. <주관심분야 : Microwave-Photonics, FDTD, Numerical analysis>

numerical analysis>

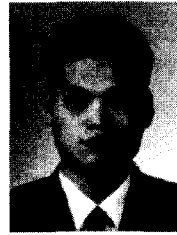
姜泰球(正會員)

1995년 : 청주대학교 전자공학과 졸업(공학석사). 1997년~현재 : 중앙대학교 첨단영상대학원 박사과정. <주관심분야 : Microwave-Photonics, 광통신>



李政勳(正會員)

1999년 2월 : 중앙대학교 전자공학과(공학사). 2001년 2월 : 중앙대학교 첨단영상대학원(공학석사). <주관심분야 : TW-PD, Microwave-Photonics, Numerical analysis>



玉成海(正會員)

1973년 2월 6일생. 1999년 2월 : 중앙대 전자공학과 졸업(공학사). 2002년 2월 : 중앙대 영상공학과 졸업(공학석사). 중앙대 전자공학과 박사과정 재학 중. <주관심분야 : 진행파형 전계흡수 변조기 설계>

孔淳哲(正會員) 論文 第38號 SD編 參照

崔永完(正會員)

1985년 : 서강대학교 전자공학과(학사). 1987년 : 버팔로 뉴욕주립(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터 공학과(공학석사). 1992년 : 버팔로 뉴욕주립(SUNY at Buffalo), 전기 및 컴퓨터 공학과(공학석사.) 1992년~1995년 : 한국전자통신연구원(ETRI), 선임연구원. 1995년~현재 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수. <주관심분야 : 광전자 및 광통신, 광스위칭 및 소자, Microwave-Photonics>