

# 고출력, 광대역 광검출기 기술

이 상 선

한양대학교 전자전기공학부

ssnlee@email.hanyang.ac.kr

## 1. 서론

최근 광통신기술의 발전을 바탕으로 경제적이고 간편한 밀리미터파의 발생, 변조 및 검파를 위한 밀리미터파-포토닉스 기술연구가 활발히 진행되고 있다. 밀리미터파-포토닉스란 광신호와 수십 GHz 이상의 고주파수 전기신호 간의 상호작용을 이해하고 이를 응용하는 연구 분야이다. 밀리미터파-포토닉스 시스템은 RF 신호의 초광대역 광신호처리(ultrawide-band optical processing), 안테나원격조정(antenna remoting), 그리고 fiber 중심의 무선 통신 시스템, 무선 케이블, 하이브리드 하이브리드 시스템(hybrid fiber-coax system), 케이블 TV 분산망(cable TV distributions), 그리고 아날로그 화이버 광링크(analog fiber-optic links) 등의 응용분야에서 관심을 받고 있다. 이러한 밀리미터파-포토닉스 시스템을 구현하기 위해서는 고출력, 광대역의 광소자들을 실현할 수 있어야 한다.

광검출기의 경우 밀리미터파-포토닉스 시스템에 적합한 광검출기는 수십~수백 채널의 밀리미터파 변조신호를 동시에 받아들여야 하므로 높은 포화전력과 광대역의 특징을 가져야만 한다. 이전의 광검출기들은 출력전력을 크게하면 대역폭이 좁아지고 대역폭을 넓히면 출력전력이 줄어드는 출력전력과 대역폭의 맞교환(tradeoff) 관계 때문에 밀리미터파-포토닉스 시스템에 적합하지가 않았다. 이러한 광검출기의 단점을 극복한 광검출기가 바로 속도정합 분포형 광검출기(velocity-matched distributed photodetector; VMDP)이다.

이 소자는 광도파로부분, 진행파형전극, 그리고 광검출기가 조합된 구조를 갖고 있다. 이들은 각각 독립적으로 최적화시킬 수 있다는 장점을 갖는다. VMDP는 주기적으로 연결된 광검출기에 의해 광도파로를 진행하는 광신호의 속도와 진행파형전극을 진행하는 마이크로파가 정합되어 각 광검출기에서 발생된 전류가 전극을 진행하며 동위상으로 더해지는 것과 전송선과 임피던스 정합을 이루는 것에 의해 고출력, 광대역을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 밀리미터파-포토닉스 시스템에 사용될 수 있는 고출력, 광대역 소자인 VMDP에 대하여 살펴

볼 것이다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이은 두 번째 절에서 광검출기의 발전과정에 대해 살펴본 후 세 번째 절에서 각 광검출기들의 특성을 비교한다. 네 번째 절에서는 VMDP의 특성을 자세히 살펴본다.

## 2. 광검출기의 형태와 특성

초기의 광검출기는 표면조사형 광검출기(surface illuminated photodetector; SIPD)로, 기판에서 전극까지 층층이 쌓은 구조를 가지고 있다. 대표적인 소자는 PIN광검출기와 MSM광검출기이다. 그림 1에 SIPD 광검출기를 간단하게 나타내었다. 그림 1에서 SIPD는 표면으로 빛이 조사되어 흡수영역에서 흡수되는 형태를 갖는다. 고출력을 위해서는 넓은 흡수영역이 필요하다. 그러나 이 소자는 얇은 흡수 영역 때문에 큰 파워를 가진 신호가 들어오면 전계차폐(electric-field screening) 효과로 인한 포화현상으로 신호의 왜곡이 생긴다. 이 효과는 주로 강한 빛이 조사되었을 때 생성된 캐리어의 집중에 의해 발생한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 그림 2와 같은 도파로형 광검출기(waveguide photodetector; WGPD)가 제시되었다<sup>1)</sup>. 그림 2와 같이 이 소자는 도파로 형태를 갖고 도파로 윗부분에 전극이 있어 광파가 진행하면서 흡수되기 때문에 SIPD보다는 흡수영역이 늘어나 더 큰 포화전력을 얻을 수 있었다. 그러나 길이가 길어짐에 따른 두 전극사이의 저항과 캐패시턴스 성분의 증가로 대역폭이 줄어드는 단점을 가지고 있다. 이 단점을 보완하기 위해 그림 3에서 보여지는 진행파형 광검출기(traveling-waveguide photodetector; TWPD)가 제시되었다<sup>2)</sup>.

그림 3과 같이 이 소자는 흡수층을 갖는 도파로 윗부분과 도파로 좌우에 전극으로 전송선로를 만들어 흡수된 전류를 마이크로파의 형태로 진행하게 하는 CPW(coplanar waveguide)와 유사한 구조로 되어있다. 넓은 흡수층을 갖고 있고 광파가 진행하면서 흡수되므로 큰 포화전류를 얻을 수 있으나 전송선을 흐르는 밀리미터파의 속도와 도파로를 진행하는 광파의 속도를 정합시키기 어려워 광대역을 얻을 수 없었다.

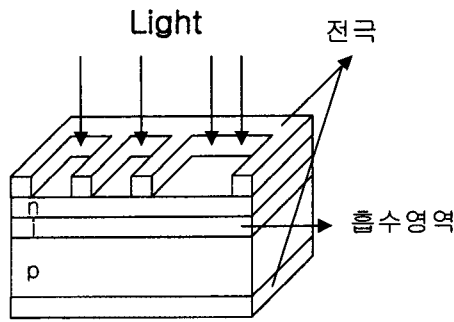


그림 1. SIPD 광검출기의 구조.

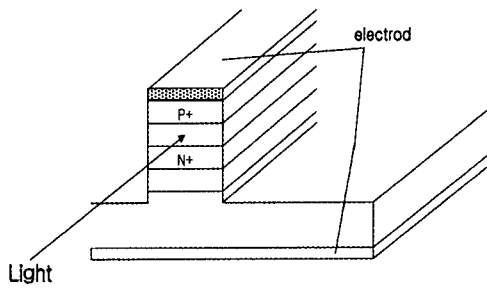


그림 2. WGPD 광검출기의 구조.

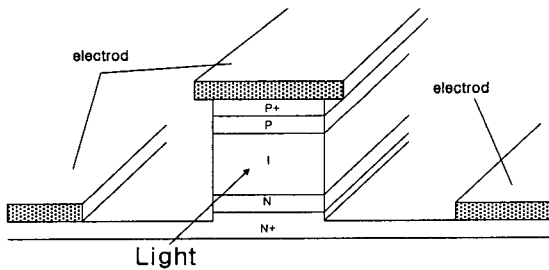


그림 3. TWPD 광검출기의 구조.

이러한 이유로 최근에 고출력, 광대역을 실현할 수 있는 광검출기인 VMDP가 제시되었다<sup>[3]</sup>. 이 소자는 속도정합 진행파형 전극의 형태로 리치 도파로의 리치 양 옆 부분에 전극으로 전송선을 만들고 리치 부분에 일정한 간격으로 MSM(metal-semiconductor-metal) 혹은 PIN 광검출기를 배열한 후 전송선에 연결시킨 형태로 되어 있다. 높은 대역폭과 진행파형 전극과의 손쉬운 접속을 위해 MSM 광검출기를 이용하는 것이 보통이다. 이 구조를 그림 4에 나타내었다. 주기적으로 배열된 광검출기는 전송선의 입장에서 볼 때 부하의 역할을 하게 된다. 일반적으로 광검출기의 저항성분은 커패시턴스 성분에 비해 많이 작기 때문에 광검출기는 용량성 부하로 간주되어진다.

광파는 MSM 광검출기에 흡수되며 도파로를 진행하게 되는데 흡수된 광파는 전류의 형태로 변형되어 전송선을 따라 밀리미터파 형태로 진행하게 된다. 이때 각 MSM 광검출기에서 흡수되어지는 전류는 전송선을 진행하고 있는 전류와 동위상이

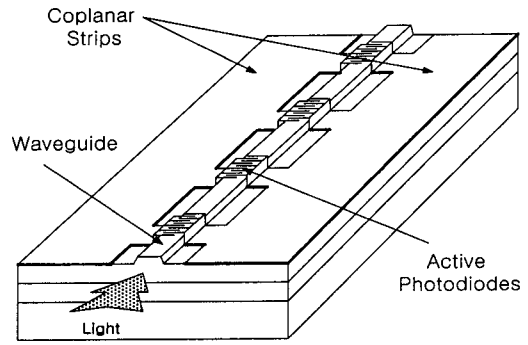


그림 4. VMDP의 구조.

되어 합쳐져야 신호의 왜곡이 생기지 않는다. 그러기 위해서는 도파로를 진행하는 광파와 전송선을 진행하는 밀리미터파의 속도가 같아야 된다. 주기적으로 연결된 MSM 광검출기를 이용하여 도파로를 진행하는 광파와 밀리미터파의 속도정합을 이루게 함으로써 신호의 왜곡을 줄여 100 GHz 이상의 광대역을 얻을 수 있게 하였다. 일반적으로 광대역 광소자의 경우, 진행파형 전극에서 임피던스 부정합에 의해 발생하는 반사에 의한 손실과, 광파와 마이크로파의 속도 부정합이 대역폭에 영향을 주게 되어 100GHz 이상의 광대역을 얻기 어렵다. 하지만 MSM 광검출기를 주기적으로 연결한다면 속도정합은 물론 임피던스 정합을 동시에 얻을 수가 있어 넓은 대역폭을 얻을 수 있다. 그리고 하나의 MSM에서 흡수되는 광전력이 포화되지 않도록 도파로를 설계하여 광파가 도파로를 진행할 때 여러 개의 MSM에서 조금씩 흡수되게 하여 고출력을 얻을 수 있다. VMDP의 대역폭은 주기적인 부하가 연결된 속도정합 진행파형 전극의 대역폭과 광검출기의 대역폭에 의해 결정된다. 일반적으로 VMDP의 대역폭은 위상속도와 임피던스가 정합되었을 경우 단일 광검출기의 대역폭과 일치한다고 알려졌지만 실제로는 주기적인 부하가 연결된 진행파형 전극의 대역폭과 광검출기의 대역폭을 비교했을 때 둘 중 작은 대역폭이 VMDP의 응답속도를 결정한다. 그러므로 전송선의 대역폭보다 넓은 대역폭을 갖는 광검출기를 이용해야 VMDP의 성능을 최대한 발휘할 수 있다. MSM 광검출기는 활성영역의 면적과 전극의 폭과 간격에 의해 특성이 결정되어진다<sup>[4]</sup>. 여기서 활성영역이란 음극과 양극의 전극이 겹치는 부분을 말한다. 본 논문에서는 앞에서 소개한 각각의 광검출기에 대한 응답특성을 비교할 것이고, 밀리미터파-포토닉스의 시스템에 적합한 VMDP에 대해서 간략히 살펴볼 것이다.

### 3. 광검출기의 특성 비교

앞에서 소개한 광검출기들의 응답특성을 비교해 볼 때 각각

의 양자효율은 다음과 같다. 여기서 양자효율이란 광검출기에 입사되는 광전력에 대한 흡수층에서 흡수된 광전력의 비율이다.

$$\eta_{SIPD} = 1 - e^{-\alpha d} \quad (1)$$

$$\eta_{WGPD} = 1 - e^{-\alpha L} \quad (2)$$

$$\eta_{TWPD} = \frac{1 - e^{-\alpha L}}{2} \quad (3)$$

$$\eta_{VMDP} = \frac{\eta_0}{2} \frac{1 - ((1 - \eta_0)\kappa^2)^N}{1 - (1 - \eta_0)\kappa^2} \quad (4)$$

앞의 식에서  $\alpha$ 는 흡수계수이고,  $d$ 는 SIPD의 흡수층의 두께를 나타낸다. 도파로 형태의 WGPD, TWPD, 그리고 VMDP의 양자효율은 검출 길이  $L$ 과 광도파로의 흡수층에 존재하는 광전력 구속율(optical confinement factor)  $\Gamma$ 에 영향을 받는다. 이들은 광전력의 전부가 흡수층에 포함되어서 흡수되는 것이 아니라 전체 광전력중 흡수층에 분포하는 광전력만이 흡수되기 때문에 양자효율을 표현할 때  $\Gamma$ 가 사용된다. 그리고 TWPD와 VMDP의 양자효율은 WGPD보다 반이 작다. 도파로의 구조는 세 형태에 모두 쓰이지만 TWPD와 VMDP의 경우, 흡수된 전력의 반은 전송선을 따라서 출력단자로 진행하고 나머지 반은 반대방향, 즉 입력단자 쪽으로 진행하기 때문에 전송선의 입력단자가 임피던스 정합이 되어있을 경우 입력단자 쪽으로 진행한 전력은 입력단자에서 흡수되고 출력이 나타나지 않게 되는 것이다. 식(4)는 주기적으로 전송선에 연결된 광검출기에서 흡수된 광전력의 양자효율이다.  $\eta_0 = 1 - e^{-\alpha L}$ 은 VMDP에서 광검출기 하나의 양자효율이다.  $N$ 은 광검출기의 총개수이며  $\kappa$ 는 광도파로에서 흡수층이 있는 부분과 없는 부분 사이의 불연속적인 면에서의 광파의 결합효율이다.

앞에서 구한 양자효율을 이용하여 각 광검출기의 포화전류를 구해보자. SIPD의 포화전류는 다음과 같다.

$$I_{SAT,SIPD} = q \int_0^d AP_0 \alpha e^{-\alpha x} dx = AI_S \quad (5)$$

$d$ 는 흡수층의 두께,  $A$ 는 흡수면적, 그리고  $P_0$ 는 포화상태에서 단위 면적당 단위시간에 입사되는 광자의 개수를 나타낸다.  $I_s$ 는 단위면적당 포화 전류 밀도이다. 는 검출기의 구조, 바이어스 조건, 물질의 종류에 따라 달라질 수 있다. SIPD의 경우 흡수층에서 진행거리에 따른 광전력의 분포는 와 같이 표현할 수 있다. 이때 각 지점에서 광자에 의해서 발생된 전류의 발생률은 그 지점에서의 광전력의 미분값에 비례하게 된다. 전류의 발생률은 단위시간당 단위 체적에서 발생하는 전자 또는 정공의 개수를 뜻한다. 따라서 전류밀도는 광전력을 미분해서 각 지점에 따라 적분함으로써 얻어지게 되며 전체 전류는 전류밀

도와 흡수층의 면적을 곱함으로써 구할 수가 있다. WGPD, TWPD, 그리고 VMDP의 포화전류는 다음과 같다.

$$I_{SAT,WGPD} = q \int_0^L W \frac{d}{\Gamma} P_0 \alpha \Gamma e^{-\alpha x} dx = \frac{W}{\alpha \Gamma} I_S \eta_{WGPD} \quad (6)$$

$$I_{SAT,TWPD} = \frac{q}{2} \int_0^L W \frac{d}{\Gamma} P_0 \alpha \Gamma e^{-\alpha x} dx = \frac{W}{\alpha \Gamma} I_S \eta_{TWPD} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} I_{SAT,VMDP} &= q \int_0^L W \frac{d}{\Gamma} P_0 \alpha \Gamma e^{-\alpha x} dx \\ &+ \kappa^2 e^{-\alpha l} q \int_0^l W \frac{d}{\Gamma} P_0 \alpha \Gamma e^{-\alpha x} dx \\ &+ \dots + \kappa^{2(N-1)} e^{-\alpha l(N-1)} q \int_0^l W \frac{d}{\Gamma} P_0 \alpha \Gamma e^{-\alpha x} dx \\ &= \frac{W}{\alpha \Gamma} I_S \eta_{VMDP} \end{aligned} \quad (8)$$

위의 식에서  $\eta$ 는 각 검출기의 양자효율,  $\Gamma$ 는 confinement factor,  $\kappa$ 는 광파의 결합효율,  $l$ 은 VMDP에서의 광검출기의 길이,  $W$ 는 광도파로의 폭,  $L$ 은 WGPD와 TWPD의 전체길이, 그리고  $N$ 은 VMDP에 연결된 광검출기의 개수를 말한다. 식(6),(7),(8)에서는 흡수층의 면적을  $W \frac{d}{\Gamma}$ 로 나타내었다. 왜냐하면 실제 흡수층의 영역은  $Wd$ 이지만 광전력의 일부분만이 흡수층에서 흡수되므로 전체 광전력 분포의 면적은  $W \frac{d}{\Gamma}$ 이기 때문이다. 일반적으로 단일모드를 얻을 수 있는 광도파로 구조에서  $W$ 는  $3\mu m$ 를 사용한다.

이제 각 광검출기의 3dB 대역폭에 대해 알아보자. SIPD와 WGPD의 대역폭은 캐리어 천이시간(transit time)과 기생 RC 시간(parasitic RC time)에 의해 결정이 되며 다음 식과 같다.

$$f_{3dB} = \left( 2.2 \frac{d}{V} + 2\pi \frac{R_L \epsilon A}{d} \right)^{-1} \quad (9)$$

식(9)에서  $V$ 는 캐리어 드리프트 속도이고,  $A$ 는 흡수 면적(WGPD의 경우,  $W \times L$ ), 그리고  $R_L$ 는 부하의 저항( $=50 \Omega$ )이다. TWPD와 VMDP의 3dB 대역폭은 광파의 속도와 밀리미터 파의 속도 부정합에 의해 제한을 받는다. 이들의 대역폭은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{3dB,TWPD} = \left( 2.2 \frac{d}{V} + 2\pi \frac{\rho \epsilon}{d} + 2\pi L \frac{V_0 - V_e}{V_0 V_e} \right)^{-1} \quad (10)$$

$$f_{3dB,VMDP} = \left( 2.2 \frac{d}{V} + 2\pi \frac{\rho \epsilon}{d} + 2\pi(N-1)\Delta \frac{V_0 - V_e}{V_0 V_e} \right)^{-1} \quad (11)$$

식(10),(11)에서  $\rho$ 는 접촉저항(contact resistivity)으로  $10^{-6}$

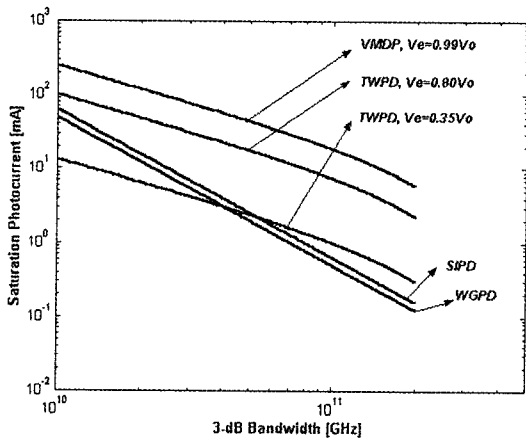


그림 5. SIPD, WGPD, TWP, VMDP의 3dB 대역폭에 따른 포화 전류.

$Q \cdot \text{cm}^2$ 의 값을 갖고,  $\Delta$ 는 VMDP에 주기적으로 연결된 광검출기의 주기를 나타낸다.  $V_0$ 는 광신호의 속도를 나타내고,  $V_c$ 는 마이크로파의 속도를 나타낸다. 식(10),(11)의 첫 항은 천이 시간을 나타내고, 둘째 항은 RC 시정수를 나타내며, 셋째 항은 광파의 속도와 마이크로파의 속도 부정합을 나타낸다. TWP와 VMDP는 진행파형전극의 특성을 갖기 때문에 RC 대역폭은 SIPD와 WGPD에서처럼 부하의 임피던스에 영향을 받는 것이 아니고 접촉저항에 영향을 받는다.  $I_{sat}$ 과  $f_{3dB}$ 는 SIPD의 경우 면적 A에 따라 변하며, WGPD와 TWP는 길이 L에 의해, VMDP의 경우 광검출기의 개수 N에 따라 변화하게 된다. 그리고  $f_{3dB}$ 를 결정하는 변수 중에 하나인 흡수층의 두께 d는  $f_{3dB}$ 가 위에서 언급한 변수 A, L, N에 따라 변할 때 최대값이 되도록 설정한다. VMDP의 경우 99%의 속도 정합( $V_c = 0.99V_0$ )이 이루어진다고 가정하며 TWP의 경우 35~80%의 속도정합이 이루어진다고 가정한다. 그림 5에 각각의 광검출기의 출력특성을 나타내었다.

그림 5는 3dB 대역폭에 따른 포화전류를 나타낸다. 3dB 대역폭이 증가할수록 포화전류가 적어지는 것을 알 수 있다. 그림 5에서 WGPD와 SIPD는 같은 특성을 갖지만 WGPD가 SIPD보다 흡수영역이 넓기 때문에 더 큰 포화전류를 갖는다는 것을 알 수 있다. 그리고 VMDP와 TWP가 같은 특성을 갖는다는 것도 알 수 있다. 그러나 VMDP는 TWP보다 속도정합이 잘 이루어지며 이로 인해 소자의 길이를 늘릴 수 있기 때문에 출력전력이 제일 크다. 이상으로 SIPD, WGPD, TWP, 그리고, VMDP의 출력특성을 간단하게 살펴 보았다.

#### 4. VMDP의 특성

VMDP는 광도파로, 전송선, 그리고 광검출기의 세 부분으로

구성된다. 광검출기는 광 신호가 흡수되는 부분으로, 광도파로 위에 주기적으로 위치하게 되며 전송선과 연결된다. 광파는 그림 2와 같이 광도파로의 입력면으로 입사를 해서 진행하게 된다. 진행하는 광신호는 주기적으로 배열된 광검출기에 흡수되어 전류 신호로 바뀌게 되며 각각의 광검출기에서 생성된 전류 신호는 속도와 임피던스가 정합 되어 있는 전송선을 따라 진행을 하여 출력 단에 나타나게 된다. VMDP의 설계에 있어서 고려해야 할 중요한 것 중 하나가 광파와 전송선을 타고 진행하는 밀리미터파의 속도정합이다. 속도정합이 되지 않을 경우 각각의 광검출기에서 발생된 전류신호는 전송선을 따라 진행하면서 서로 다른 위상을 가지고 합쳐지기 때문에 출력특성이 나빠지게 된다. VMDP의 장점은 VMDP를 구성하는 각 부분이 독립적으로 최적화 될 수 있다는 것이다. 즉 광도파로는 높은 광 결합 효율을 얻을 수 있도록, 그리고 광전력이 흡수층에서 포화상태가 아닌 상태에서 흡수되도록 설계하며, 전송선은 진행하는 밀리미터파가 도파로를 진행하는 광파의 속도와 일치하도록, 그리고 특성 임피던스가 입력력부하와 정합되도록 설계한다. 광검출기는 빠른 응답특성을 갖도록 설계한다. VMDP의 대역폭은 MSM 광검출기 하나의 대역폭과 속도 부정합에 의해 결정되는 대역폭중 작은것에 의해 결정되므로 빠른 MSM 광 검출기를 이용해야 최적의 VMDP를 설계할 수 있다. 이제 각 부분에 대한 특성을 살펴보도록 하겠다.

#### 4.1 MSM 광검출기의 특성

VMDP의 세 부분 중 한 부분인 광 검출기 부분을 살펴보도록 하자. MSM 광 검출기는 흡수층위에 전극을 쌓은 형태로 공정이 간단하고, 쉽게 다른 소자와 집적할 수 있으며, 적은 커패시턴스로 인해 속도가 빠르다. MSM 광 검출기의 구조는 그림 6과 같다.

그림 6에서 p는 전극하나와 간격을 더한 길이를 나타내고, w는 전극의 폭을 나타내며, t는 전극의 두께를 나타낸다.  $f_{overlap}$

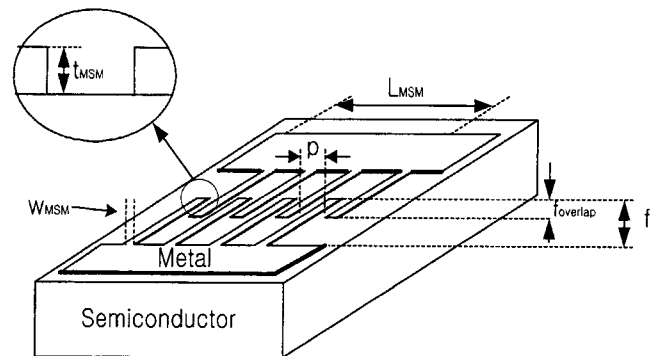


그림 6. MSM 광 검출기의 구조.

는 두 전극이 겹치는 길이를 나타내고,  $f$ 는 전극하나의 길이를 나타내며,  $L$ 은 광 검출기의 길이를 나타낸다. 여기서 쓰이는 MSM광 검출기는 일반적으로 대역폭이 천이시간과 RC 시정수에 의해 결정된다. 천이시간은 식(11)과 같이 구해지고 RC 시간은 식(12)와 같이 구해진다. MSM 광 검출기의 RC 시간은 검출기의 커패시턴스와 전송선의 임피던스로 표현된다<sup>[4]</sup>.

$$\tau_i = \frac{s}{2 \cdot v_{SAT}} \quad (11)$$

$$\tau_{RC} = 0.69 \cdot R_{sil} \cdot C \quad (12)$$

식(11)에서  $s$ 는 전극간의 간격을 나타내고,  $v_{SAT}$ 는 포화속도를 나타낸다. 식(12)에서  $R_{sil}$ 은 MSM광 검출기가 연결된 전송선의 임피던스를 나타내고  $C$ 는 커패시턴스를 나타낸다.

$$C_0 = \frac{\epsilon_0(1 + \epsilon_r)K(k)}{K'(k)} \quad (13)$$

$$k = \tan^2 \frac{\pi W_{MSM}}{4p} \quad (14)$$

$$C = C_0 \times A/p \quad (15)$$

식(13)에서  $C_0$ 는 전극 한 쌍의 단위 길이당 커패시턴스를 나타내고,  $\epsilon_r$ 은 기판의 상대 유전율을 나타낸다.  $K$ 와  $K'$ 는 타원 적분(elliptic integrals)이다. 식(15)에서  $A$ 는 광검출기의 활성 영역을 말한다. 그림 7은 InGaAsP를 기판으로 하는 MSM 광 검출기의 전극의 폭과 피치의 비에 의한 단위 길이당 커패시턴스를 나타내었다<sup>[4]</sup>.

그림 14에서 전극의 폭과 피치의 비가 같기만 하면 단위길이당 커패시턴스는 일정함을 알 수 있다. 그리고, MSM광 검출기의 전체 커패시턴스는 전극 쌍의 개수와  $f_{overlap}$ 에 의해 정해

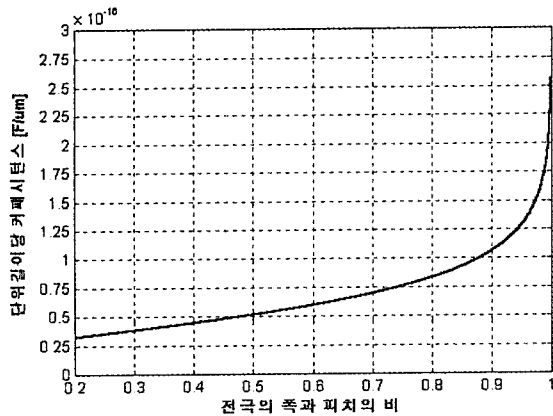


그림 7. MSM광 검출기의 전극의 폭과 피치의 비에 따른 단위길이당 커패시턴스.

진다. 그러므로 MSM광 검출기의 길이와  $f_{overlap}$ 이 같을 때 전극 쌍의 개수에 의해서 전체 커패시턴스의 크고 작음이 결정된다. 즉,  $f_{overlap}$ 이 같을 경우 전극 쌍의 개수가 적을수록 커패시턴스가 작아진다. MSM의 대역폭은 식(16)과 같이 구할 수 있다.

$$f_{3dB} = \frac{0.443}{FWHM} \quad (16)$$

식(16)에서 FWHM은 식(17)과 같다<sup>[4]</sup>.

$$FWHM = \sqrt{\tau_i^2 + \tau_{RC}^2} \quad (17)$$

검출기의 특성을 살펴보기 위해 전극의 폭과 간격에 따른 RC 시간, 천이시간, 그리고 3dB 대역폭을 표 1에 나타내었다. MSM광 검출기의  $f_{overlap}$ 를  $7\mu m$ 로 하였고, 흡수층의 굴절율은 3.26으로 하였으며, 길이는  $15\mu m$ 로 하였다. 그리고 포화속도를  $2 \times 10^7 cm/s$ 로 하였고, 전송선의 임피던스를  $75 \Omega$ 로 하였다.

표 1을 보면 300/300 일때 3dB 대역폭이 가장 큰 것을 알 수 있다.

#### 4.2 광도파로의 특성

광도파로 부분은 단일 모드를 유지시킬 수 있도록 설계되어야 한다. 광파는 도파로를 진행하며 MSM이 있는 영역과 없는 영역을 진행하게 된다. 흡수층이 있는 영역과 없는 영역의 도파로 구조가 틀기 때문에 각의 영역에서의 유효굴절율은 틀려진다. 이 때문에 광파가 진행할 때 손실이 있게 된다. 이 손실에 의한 양을 광파의 결합효율로 나타내는데, 이 값을 구하기 위해서 흡수층이 있는 광도파로에서 나타날 수 있는 전계분포와 흡수 층이 없는 곳에서의 전계분포를 알아야 한다. 그리고 광파의 속도를 알기 위해서는 광 도파로에서 존재할 수 있는 모드의 유효 굴절율을 알아야 한다. VMDP를 비롯해서 TWPD나 WGPD와 같은 도파로형 광검출기의 구조에서 설계시 주의해야 할 사항 중의 하나가 입사시 광신호의 전력 대부분이 도파로로 결합되도록 설계해야 하는 것이다.

표 1. 전극의 폭과 간격에 따른 transit time, RC time constant, 그리고 3dB 대역폭

반도체	$In_{0.58}Ga_{0.42}As_{0.9}P_{0.1}$		
전극의 폭/간격(nm)	100/100	200/200	300/300
Transit time(ps)	0.25	0.5	0.75
RC time(ps)	1.4	0.7	0.35
3dB대역폭(GHz)	311	515	534

뿐만 아니라 광파의 결합효율이 95% 이상이 되도록 설계해야 한다. 흡수 층이 있는 부분과 없는 부분사이에서 발생하는 손실의 양은 여러 개의 불연속 면이 존재하는 VMDP의 성능에 큰 영향을 끼친다. 또한 도파로 설계시 고려해야 할 사항중의 하나는 한꺼번에 많은 광 전력이 흡수 층에서 흡수되지 않도록 해서 포화 전류가 발생하지 않게 하는 것이다. 이상의 조건을 고려하여 설계한 도파로의 구조는 그림 8과 같다. 광 도파로는 현재 광 통신 시스템에서 사용하는 파장대역인 1.55  $\mu$ m에서 동작하기 위해서 InP/ InGaAsP를 사용한다. 그림 8에서와 같이 InP기판위에 기판과 격자크기가 정합되어 있는 0.2 $\mu$ m 두께의 In<sub>0.68</sub>Ga<sub>0.32</sub>As<sub>0.7</sub>P<sub>0.3</sub> 클래딩층이 있고 그 위에 0.8 $\mu$ m의 In<sub>0.63</sub>Ga<sub>0.37</sub>As<sub>0.8</sub>P<sub>0.2</sub> core layer가 있으며 그 위에 0.25 $\mu$ m의 In<sub>0.69</sub>Ga<sub>0.31</sub>As<sub>0.66</sub>P<sub>0.34</sub> 클래딩층이 존재한다. 클래딩 층은 0.15 $\mu$ m 깊이만큼 에칭을 시켜서 릿지형 도파로를 만든다. 그 위에는 0.15 $\mu$ m 두께의 In<sub>0.58</sub>Ga<sub>0.42</sub>As<sub>0.9</sub>P<sub>0.1</sub> 흡수 층이 존재하며 다시 InP를 그 위에 쌓는다. 흡수 층의 위에 다시 InP를 올리는 이유는 그 위에 금속을 입혀서 MSM 다이오드를 만들 경우 금속과 반도체 사이의 쇼트전극특성을 개선하기 위해서 이다.

그림 8의 광 도파로에서 유기되는 결합 효율과 광전력 구속률, 단일모드의 유효 굴절률과 전계 분포를 얻기 위해서

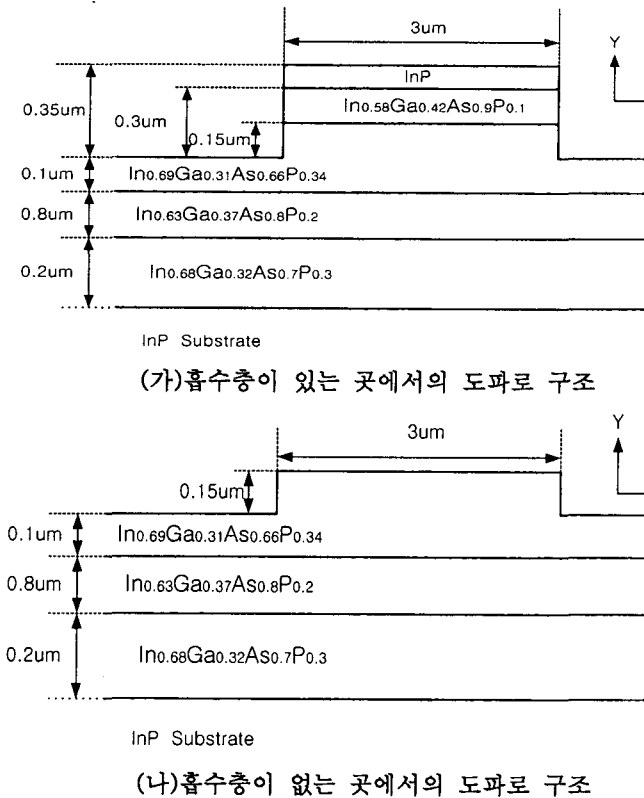
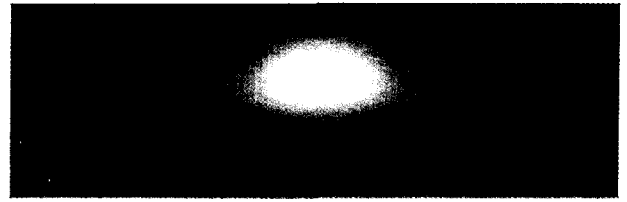
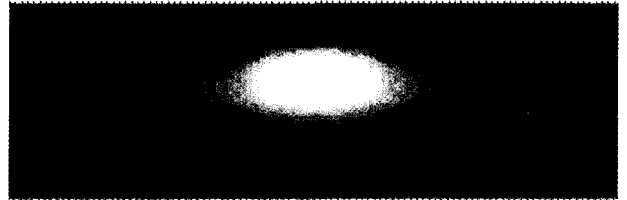


그림 8. 도파로의 구조.



(가) 흡수층이 있는 도파로에서의 모드분포



(나) 흡수층이 없는 도파로에서의 모드분포

그림 9. 도파로 내에서 유기되는 모드 분포.

FEM(Finite element method)<sup>[5]</sup>을 사용하였다. 결과 광 도파로에서 유기되는 모드의 전계 분포는 그림 9과 같다.

시뮬레이션 결과 광 도파로를 진행하는 광 파의 유효 굴절률은 3.2였으며 광파의 속도는 식(18)와 같이 구해진다.

$$v_{opt} = \frac{c}{N_{eff}} \quad (18)$$

흡수 층이 있는 광 도파로와 없는 광 도파로 간의 광파의 결합효율은 식(19)을 이용해서 구해진다.

$$\kappa = \frac{\left| \iint E^{active}(x,y) \cdot E^{passive}(x,y)^* dx dy \right|}{\iint |E^{active}(x,y)|^2 dx dy \cdot \iint |E^{passive}(x,y)|^2 dx dy} \quad (19)$$

$E^{active}(x,y)$ 는 흡수 층이 있는 도파로에서의 전계분포이며  $E^{passive}(x,y)$ 는 흡수 층이 없는 도파로에서의 전계분포이다. 계산 결과 결합효율은 약 0.9525이다. 각 MSM의 양자효율을 알기 위해서는  $\Gamma$ (Optical confinement factor)를 구해야 하며 이는 식(20)로 구해진다.

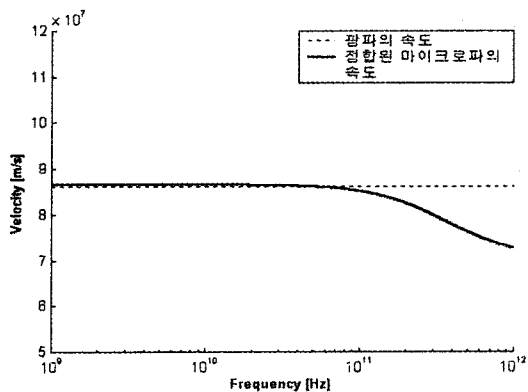
$$\Gamma = \frac{\int_{x_a}^{x_b} \int_{y_a}^{y_b} |E^{active}(x,y)|^2 dy dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |E^{active}(x,y)|^2 dy dx} \quad (20)$$

$x_a, x_b$ 는 흡수 층의 축에 따른 영역이며  $y_a, y_b$ 는 y축에 따른 흡수 층의 영역이며 계산결과  $\Gamma=0.01$ 이다. 이상으로 최적화된 도파로를 설계하였다. 설계시 중요한 것은 단일 모드를 유

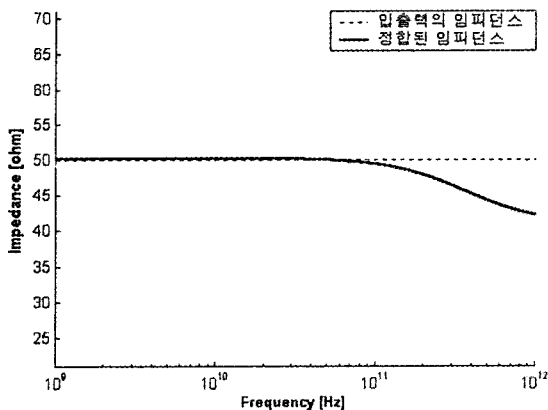
기 시킬 수 있는 도파로를 설계하는 것과 광파가 흡수층이 있는 도파로와 흡수층이 없는 도파로 진행할 때 최대의 결합효율을 얻음과 동시에 흡수층이 포화되지 않도록  $\Gamma$  값을 적당히 선택하는 것이다.

### 4.3 전송선의 특성

VMDP의 전송선 부분은 주기적인 부하(MSM 광검출기)가 연결된 CPS의 구조이다. 전송선은 광도파로를 진행하는 광파의 속도와 전송선을 진행하는 마이크로파의 속도가 정합이 되도록 그리고 동시에 임피던스 정합이 되도록 설계를 해야 한다. CPS구조로는 속도정합과 임피던스 정합을 동시에 얻기 어렵다. 그러나, CPS 전극사이에 용량성 부하를 주기적으로 연결하면 마이크로파의 속도를 감소시킬 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다<sup>6)</sup>. 이는 마이크로파가 전극을 진행하면서 주기적으로 연결된 부하를 충전 전 시키며 진행하므로 속도가 줄어들기 때문이다. 그리고 이러한 부하의 연결은 당연히 CPS의 특성 임피던스를 변화시킨다. 그림 10에 CPS에 주기적인 부하를



(가) 정합된 마이크로파의 속도



(나) 정합된 특성 임피던스

그림 10. 정합된 마이크로파의 속도와 특성 임피던스.

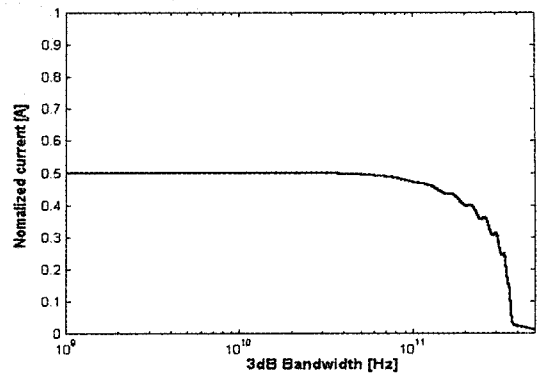


그림 11. 10개의 MSM을 연결한 VMDP의 출력특성.

연결했을 때의 정합된 마이크로파 속도와 임피던스를 나타내었다.

그림 10에서 마이크로파와 임피던스정합이 잘 이루어졌음을 볼 수 있다.

### 4.4 VMDP의 응답 특성

VMDP는 주기적으로 연결되는 MSM 광검출기의 수를 증가시킬수록 출력전류가 증가하지만 어떤 한계이상 연결한다면 다시 출력전류가 줄어들게 된다. 이것은 결합효율과 도파로 손실, 도체 손실, 유전손실, 그리고 방사손실 때문에 길이가 길어짐에 의해 손실이 커지기 때문이다. 입력단에 부하를 연결했을 때 MSM 광검출기 10개를 연결한 VMDP의 대역폭은 그림 11과 같다.

그림 11에서 보통 MSM 광검출기 한 개의 대역폭은 200~300 GHz 정도 이므로 응답이 충분히 빠르다는 가정과 VMDP의 도파로 손실, 도체손실, 유전손실, 그리고 방사손실이 없다는 가정하에 입사된 광전력에 대해 정규화한 그림으로 대역폭이 200 GHz 이상 되는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

이상으로 광검출기의 발전과정과 각 광검출기의 특성에 대해 간단하게 알아 보았다. VMDP의 특징은 이 소자를 구성하고 있는 세 부분(광도파로 부분, 광검출기 부분, 그리고 전송선 부분)을 독립적으로 최적화시킬 수 있다는 것이다. 이로 인해 VMDP는 넓은 대역폭과 고출력의 특성을 갖기 때문에 밀리미터파-포토닉스를 위한 시스템에 적합한 소자이다. 또한, 광대역 MSM 광검출기의 구조와 속도정합 진행파형 전극의 구조를 최적화함으로써 VMDP의 출력과 속도를 극대화 할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. A. R. Williams, A. L. Kellner, and P. K. L. Yu. "Dynamic range performance of a high speed high saturation InGaAs/InP pin waveguide photodetector", *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 7, pp. 548-549, 1995.
2. H. F. Taylor, O. Eknayan, C. S. Park, K. N. Choi, and K. Chang, "Traveling wave photodetectors", *SPIE: Opt. Signal Processing Phased-Array Antennas II*, vol. 1217, pp. 59-63, 1990.
3. L. Y. Lin, M. C. Wu, T. Itoh, T. A. 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, no. 8, pp. 1320-1331, 1997.
4. S. Y. Chou, and M. Y. Liu, "Nanoscale tera-hertz metal-semiconductor-metal photodetector", *IEEE J. Quantum Electron.* vol. 28, no. 10, pp. 2358-2368, Oct. 1992.
5. J. Jin, *The Finite Element Method in Electromagnetics*. John Wiley & Sons, INC., 1993.
6. R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd ed. New York : McGraw-Hill, 1992, ch. 8.

---

### 저자약력

성 명 : 이상선  
근 무 처 : 한양대학교 전자전기공학부  
최종 학력 : 플로리다대학 공학박사  
주요 경력 : 생산기술연구원 조교수겸 선임연구원  
전자부품연구원 선임연구원  
E-mail : ssnlee@email.hanyang.ac.kr