진행파형 광 검출기의 비선형성

문연태, 윤영설, 최영완
중앙대학교 전자전기공학부 광전자 및 광통신

Nonlinearity of Traveling-wave Photodetector

Yon-Tae. Moon, Young-Seol. Yun, Young-Wan. Choi
School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University

Abstract - 진행파형 광 검출기의 흡수영역에 입사되는 광전력은 흡수계수의 비로써 흡수되어 광전류를 생성한다. 흡수계수는 입사되는 작은 광전력에 독립적이지만, 충분히 큰 광전력에 대해서는 비선형적 함수가 된다. 본 논문에서는 입사되는 광전력의 크기에 따라 흡수계수가 비선형적으로 변화하는 식을 광포화 현상을 포함하여 모델링 하였고, 모델링 한 식을 사용하여 흡수영역에서 생성된 광전류를 계산하였다. 포화흡수로 인해 생성된 광전류가 비선형 특성이 나타남을 모의실험으로 계산하였다. 위의 결과를 입력 광전력에 독립적인 흡수계수를 이용하여 계산한 광전류와 비교하였다. 그리고 입사되는 광전력에 따라 생성된 비선형적 광전류의 특성을 투-톤 실험을 통해 고조파 성분으로 계산하였다.

1. 서 론

초고속/대용량의 정보처리 및 통신 시대는 광통신 분야의 발전을 요구하게 되고 이에 새로운 연구영역인 Microwave-Photonics(MWP)의 기술 연구가 활발히 진행되고 있다. 아날로그 파이버-광 링크, 케이블 TV, 광케이블 백본(Backbone)기반의 무선 케이블, 통신 시스템 등과 같은 분야에서 광범위한 응용을 갖는다. 이 기술의 세부적인 응용에는 Traveling-wave 형태의 변조기(EAM, EOM) 및 광검출기가 연구되고 있고, 소형화된 초고속 고효율 광검출기는 MWP 시스템 구현을 위해 반드시 극복되어야 하는 매우 중요한 기술이다. 광 검출기의 성능은 3가지로 압축할 수 있다. 첫째는 대역폭 특성이다. 이것은 '통신시스템이 얼마나 넓은 대역폭을 확보할 수 있느냐?' 의 문제이다. 둘째는 효율(efficiency)이다. 이는 입사된 광전력을 '얼마나 많이 RF 전류로 변환시킬 수 있는가?'의 문제이다. 셋째로 입사 포화 전력(Saturation Power)이다. 광 검출기는 출력 신호의 왜곡없이 높은 광 입력 전력 하에서 동작해야 한다. 그러면 신호 대 잡음비와 SFDR(spurious free dynamic range)을 증가 시킬 수 있다.[1]

최근 광 검출기의 비선형성을 분석하는 논문들이 발표되고 있다. 이는 높은 출력을 갖는 레이저와 증폭기 개발되었고, 광 검출기의 내재적인 비선형성

때문이다. 광 검출기의 비선형성은 높은 안정성 아날로그와 디지털 통신 시스템에서 중요한 제한 요인일 수 있다. 본 논문에서는 위의 문제를 해결하고자 넓은 대역폭에서 동작하는 TWPD(Traveling-wave photodetector)의 비선형적 특성을 분석하였다. 흡수계수를 광 검출기의 입사되는 광전력의 함수로 모델링하였다. 이 함수는 긴 도파로 형태의 TWPD를 광 진행방향으로 분할하여 각각의 분할영역에서 생성되는 광전류를 계산하는데 적용하였다. 광 검출기의 출력인 광전류는 포화전력 보다 큰 광전력이 흡수영역에 입사될 때, 포화현상이 발생함을 모의실험 결과를 통해 보여준다. 이런 포화현상이 의미 하는 바를 분석하였고, 광 투톤 실험으로 비선형적 특성인 하모닉 성분을 계산하였다.

2. 본 론

2.1 소자 구조 및 모의실험 방법

TWPD는 1.55 μm 동작을 위한 진행파형 광 검출기의 층 구조는 그림 1. 에 보인 바와 같다. 이 층 구조는 릿지(Ridge)부분에 위치한다. 1.55 μm 동작을 위한 진행파형 광 검출기의 층 구조는 다음과 같다. 진성 영역은 양자우물구조로 InGaAsP(1.48Q)로 구성되며 그 위 아래로 InGaAsP(1.3Q)를 쌓았다. p와 n은 오믹 접촉 층으로 구성하였다. n^+ 층의 전도도는 도핑 수준 10^{18} cm^{-3} 에 해당하는 240 (1/ohm · cm), n층은 $3x10^{17}$ cm^{-3} 에 해당하는 1.98 (1/ohm · cm), p층은 $3x10^{17}$ cm^{-3} 에 대응하는 1.98 1.98 (1/ohm · cm), 그리고 p+ 층은 $1x10^{18}$ cm^{-3} 의 도핑 수준에 대응하는 240 (1/ohm · cm)의 전도도 값을 가정하였다.

TWPD는 수직-입사 광 검출기와 달리 수평 입사되는 기하학적 구조로 되어 있다. 즉, 수평 입사되는 광전력은 긴 도파로 안에서 포화 흡수로 인해 흡수되지 않고 다음 분할영역에 전달된다. 흡수 측면에 있어서 도파로형 구조는 광자의 흡수를 충분히 할 수 있는 이점이 있다. 광자의 흡수는 소자의 흡수영역의 DOS(Density of State)의 포화 여부에 따라 양이 달라진다. 수평 입사되는 작은 광전력은 DOS를 포화시키지 않기 때문에 독립적이지만, 충분히 큰 광전력은 DOS를 포화시켜 흡수계수를 광전력의 비선형적 함수로 나타낸다.[2][3] 여기서 큰 광전력은 흡수영역의 DOS (Density of State)을 포화 시키게 되고 포화의 영향으로 광자를 더 이상 흡수하지 못하게 된다. 따라서 흡수되지 않은 광자는 긴 도파로의 다음 영역에 전달되어 흡수된다. 광자의 포화흡수 메커니즘은 긴 도파로 형태를 갖는 진행파형 광 검출기에서 비선형성을 분석하는데 매우 중요하다. 이에 입사되는 광전력에 대한 흡수계수를 다음과 같이 모델링 하였다.[4]

$$\alpha(P_{in}) = \frac{\alpha_0}{1 + P_{in}/P_{sat}} \quad (1)$$

여기서 α_0는 검출기를 진행하는 광 모드의 필드흡수계수이고, P_{in}은 입력 광전력, P_{sat}은 포화전력이다. 식 (1)에서 물질 흡수계수가 절반이 되는 흡수계수를 포화흡수계수라 한다. 광전력 보다 큰 입력 광전력이 입사 될 때 흡수계수는 포화흡수계수가 된다. 그림 2. 는 식 (1)을 입력 광전력에 대한 흡수계수 함수를 나타낸 결과이다. 입사되는 광전력에 따라 흡수계수는 비선형적 함수가 됨을 알 수 있다. 그림 3. 는 각각의 분할영역에서의 흡수계수를 보여준다.

TWPD는 긴 도파로 형태를 갖는다. 수직 입사 P-i-N 검출기와 달리 긴 도파로에서 흡수가 일어난다. 위와 같은 흡수 메커니즘을 갖는 TWPD에서 생성되는 광전류를 계산하기 위해 도파로를 N개로 분할했다. 각 분할영역에서 생성되는 광전류를 계산하는 식은 다음과 같다.[4]

$$i_{Total} = \sum_{n=1}^{N} P_{in(n)} \Gamma\alpha_{(n)} \cdot exp(-\Gamma\alpha_{(n)} \cdot dy_{(n)}) \quad (2)$$

여기서 P_{in}은 Y=0 일 때 입사되는 광전력, α는 흡수계수, dy는 단위 분할길이, Γ는 광구속 인자, N은 분할한 개수이다. i_{Total}은 분할된 영역에서 생성된 광전류의 합이다.

소자의 앞단에 입력되는 DC 광전력은 각 단위영역에서 흡수되고, 흡수된 광자 하나는 한 쌍의 전자-홀을 생성함을 가정하였다. 이소자의 흡수계수는 1000 cm^{-1}, 포화 전력은 2 mW, 광구속 인자는 0.1, 소자의 길이는 100 μm이다. 그림 4. 는 진행파형 광 검출기의 구조와 광 모드 진행방향의 분할 방법이다.

2.2 모의실험 결과

흡수계수는 각 분할영역에 입력된 광전력에 대한 출력된 광전력의 비이다. 입력된 광전력의 크기가 포화전력에 가까워지면 포화흡수가 일어나게 되고, 포화흡수에 의해서 생성된 광전류는 포화현상이 나타난다. 그러나 흡수계수가 입력 광전력에 독립적이면, 입사된 광자의 흡수는 일정한 비율로 흡수가 되어 광전력이 증가함에 따라 광전류는 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 입력 광전력에 대해 생성된 광전류의 모의실험 결과는 그림 5. 에 나타난다. 그림 5.는 고정된 흡수계수와 입력 광전력에 따른 흡수계수를 고려하여 모의실험 하였으며, 길이 가변에 따른 결과를 보여준다. 소자의 길이가 100 μm일 때, 고정된 흡수계수는 소자의 길이에 따라 반응도(Responsivity)가 증가되고 선형적이다. 이는 진행파형 광 검출기의 장점으로 높은 효율(efficiency)을 보여주는 것이다. 소자 길이가 길어짐에 따라 긴 도파로에서 흡수가 추가적으로 발생하게 된다. 따라서 반응도(Responsivity)가 증가함을 알 수 있다.

하지만, 긴 도파로에서 흡수를 하는 경우 포화전력 이상의 파워는 소자의 앞단에서 DOS가 포화되어 더 이상 흡수되지 않는다. 흡수되지 않은 파워는 흡수될 때 까지 소자의 끝단으로 진행하게 된다. 이와 같은 흡수 메커니즘을 적용하기 위해 소자를 광파의 진행 방향으로 분할하였다. Distributed 구조에서 생성되는 광전류와 같이 각각의 분할영역에서 생성되는 광전류를 합하는 방법을 사용하였다. 따라서, 그림 5. 에서 100 μm 이고, 흡수계수를 고려한 광전류 프로파일의 경우 포화흡수의 영향으로 2 mW에서 포화되는 경향을 보인다. 소자 길이가 100 μm보다 300 μm 인 경우에 입력 광전력 대비 생성되는 광전류의 프로파일이 더욱더 선형적임을 알 수 있다. 이는 입사되는 광전력이 포화 흡수에 의해서 작게 흡수되고 흡수되지 않은 광자는 도파로 끝단으로 빠져나가게 된다. 하지만, 도파로 길이가 300 μm인 경우는 소자의 길이가 길어짐에 따라 흡수되는 총 광자는 많아지고, 포화전력 이상의 파워에 대해서도 긴 도파로를 통해 흡수를 충분히 할 수 있음을 보여준다. 따라서 후자의 경우가 보다 선형적인 특성을 보인다. 위의 결과는 소자의 길이가 길어짐에 따라 전류입장에서 본 포화전력이 증가됨을 보여준다.[4] 하지만, TWPD는 소자의 길이가 길어짐에 따라 마이크로파 손실이 증가하게 되고, 이는 대역폭에 영향을 받는다.[5][6]

그림 5. 에서 보는 바와 같이 포화 흡수에 의해 기인한 비선형성을 알아보기 위해 소자길이가 100 μm 인 소자에 투톤 실험을 하였다. 소자의 입력에 변조된 광 투톤을 입사시켰다. 투톤의 주파수는 9.5 GHz, 10.5 GHz 이다. 입사된 투톤은 다음과 같다.

$$Optical_{IN} = Optical_{DC} + AmpCos(w_1 t) + AmpCos(w_2 t) \quad (3)$$

$Optical_{DC}$는 2 mW로 하였고 코사인 함수의 크기는 0.1 mW~ 1 mW 까지 증가 시켰다. 광 검출기의 잡음레벨은 열잡음과 산탄잡음을 고려하였으며, 계산결과 -162 dBm/Hz 이다. 그림 6. 은 Fundamental 신호와 Harmonic 성분을 보여준다. 광 검출기에서 나오는 광전류를 50 Ω 시스템을 가정하여 RF 출력값으로 계산하였다. 그림 6.에서 보면 잡음레벨을 고려하여 -3 dBm에서 SFDR이 110 dBc임을 알 수 있다.

3. 결 론

TWPD의 비선형성을 입사되는 광전력에 의해 발생함을 모의실험을 통해 분석하였다. 도파로를 광모드 진행방향으로 분할하여 흡수되는 광자의 양을 구하였다. 흡수되는 광자의 양은 흡수계수를 입력되는 광전력의 함수로 모델링하여 구하였고, 효율이 '1' 이라는 가정하여 광전류로 환산하였다. 이 광전류는 입사되는 전력이 포화전력 이상으로 입사했을때 포화현상을 보였으며, 투-톤 실험을 통해 하모닉 성분을 계산함으로써 입력 광전력에 따른 비선형성이 존재함을 보였다. 길이가 길어짐에 따라 입력 광전력에 대한 광전류의 반응도(Responsivity)가 좋아져서 선형성을 보여준다. 하지만, 마이크로파 측면에서 보면 길이가 길어짐에 따라 마이크로파 손실의 영향을 받아 trade-off 관계가 있음을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Y.J. Chiu, "Sub-terahertz traveling -wave low-temperature grown-GaAs P-I-N photodetector",

ECE Technical Report, May, 1999.
[2] Palph B. James, Darryl L. smith, "Theory of nonlinear optical absorption associated with free carriers in semiconductors", *IEEE J. Quantum Electron.*,VOL. QE-18, NO.11, November 1982.
[3] A.M. Fox, A.C. Maciel, M.G. Shorthose, and J.F. Ryan, "Nonlinear excitonic optical absorption in GaInAs/InP quantum wells", *Appl.Phys.Lett.* 51(1), 6 July 1987.
[4] L.Y. Lin, M.C. Wu, T. Itoh, "High -power high-speed photodetctors -design, analysis, and experimental demonstration, IEEE TMTT, VOL.45, NO. 8, August 1997.
[5] GaAs-based, 1.55 m high speed, high saturation power, low-temperature grown GaAs p-i-n photodetector Yi-Jen Chiu; Zhang, S.Z.; Fleischer, S.B.; Bowers, J.E.; Mishra, U.K.; Electronics Letters ,Volume: 34 , Issue: 12 , Pages:1253 - 1255, 11 June 1998.
[5] Soon-Chel Kong, Sang-Jun Yoon, and Young-Wan Choi, "Microwave characteristics of log TWPD's for high-power operation," Microwave and Optical Technol. Lett., Vol.35, pp.51-54, October 2002.
[6] Soon-Chel Kong, Seung-Jin Lee, Jung-Hoon Lee, and Young-Wan Choi, "Numerical analysis of traveling-wave photodectors' bandwidth using the finite-difference time-domain method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol.50, no.11, pp.2589 - 2597,Nov. 2002.

Doping	Material
1.00E+18	p+-InP
3.00E+17	p-InP
	i-InGaAsP
MQW	i-InGaAsP
	i-InGaAsP
3.00E+17	n-InP
1.00E+18	n-InGaAsP
1.00E+18	n+-InP
InP S.I. wafer	

그림 1. 광 검출기의 층 구조

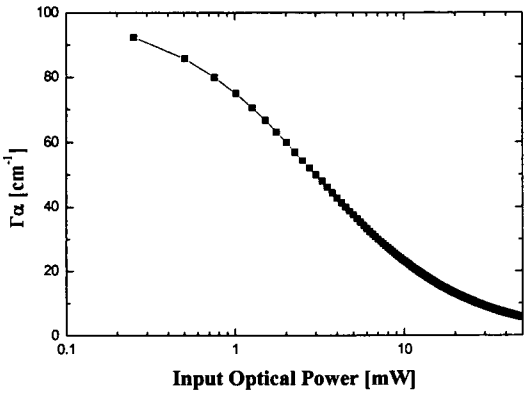

그림 2. 입사 광전력에 따른 흡수계수

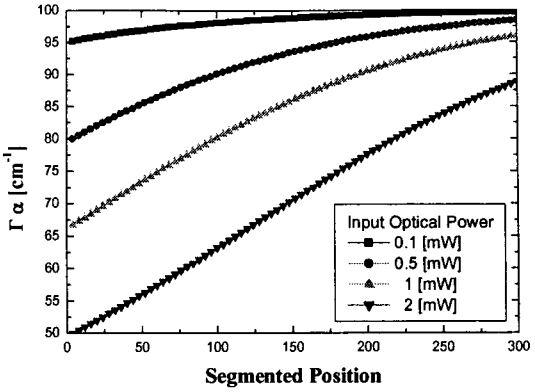

그림 3. 분할된 소자길이에 따른 흡수계수

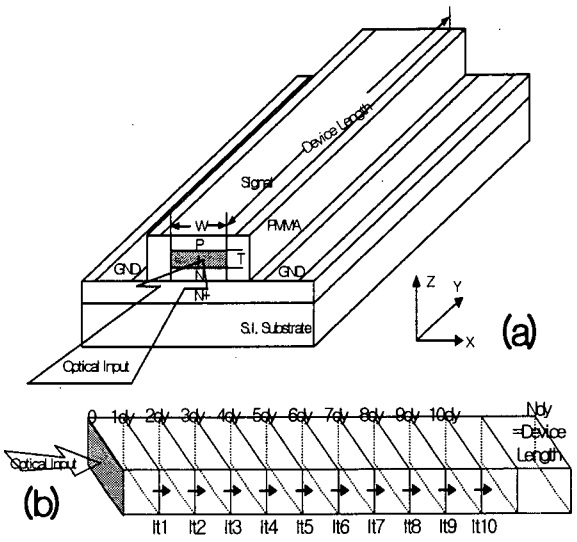

그림 4. (a) 소자구조 및 (b) 분할 방법

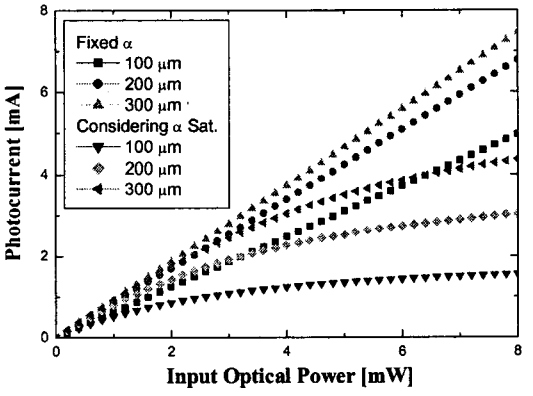

그림 5. 입력 광전력에 대한 광전류

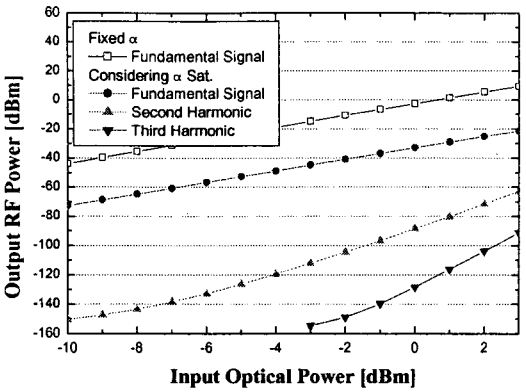

그림 6. Fundamental 신호와 Harmonic 성분