

論文97-34D-5-8

매우 낮은 암전류를 가지는 Schottky Barrier Enhanced InAlAs/InGaAs Metal Semiconductor Metal 광다이오드

(InAlAs/InGaAs Schottky Barrier Enhanced Metal Semiconductor Metal Photodiode with very low dark current)

金正培*, 金紋廷*, 金成俊*

(Jung-Bae Kim, Moon-Jung Kim, and Sung-June Kim)

요 약

본 논문에서는 매우 낮은 암전류 특성과 고속 특성을 갖는 large-area InGaAs Metal Semiconductor Metal(MSM) 광다이오드(PD)의 제작을 보인다. $300 \times 300 \text{ um}^2$ 의 large active area위에 4 um 간격을 갖는 Cr/Au Schottky metal finger를 사용한 검출기는 10 V에서 38 nA의 낮은 암전류, 0.8 pF의 낮은 capacitance, 2.4 GHz의 높은 3-dB 대역폭을 나타낸다. 우리가 아는 한 이 특성들은 large area InGaAs MSM 광다이오드로부터 얻어진 지금까지 발표된 결과 중 가장 우수하다. 제작된 소자의 주파수 특성을 분석하기 위하여 RC 등가 모델과 캐리어의 주행시간을 고려한 주파수 영역 전류 응답 모델이 사용되었다.

Abstract

In this paper we report the fabrication of an InGaAs Metal-Semiconductor-Metal(MSM) photodiode(PD) with an InAlAs barrier enhancement layer that has very low dark current and high speed characteristics. The detector using Cr/Au Schottky metal fingers with 4 um spacing on a large active area of $300 \times 300 \text{ um}^2$ offers a low dark current of 38 nA at 10 V, a low capacitance of 0.8 pF, and a high 3-dB bandwidth of 2.4 GHz. To our knowledge, these characteristics are better than any previously published results obtained from large area InGaAs MSM PD's. The RC equivalent model and frequency domain current response model considering transit time were also used to analyze the frequency characteristic of the fabricated device.

I. 서 론

MSM 광다이오드는 구조가 간단하고 FET 등의 다른 전자소자와 제작공정상 호환되며, 캐패시턴스가 낮아서 감도-대역폭 곱의 특성이 매우 좋은 등의 많은 잇점들에 의해 고속 광전자집적회로 (Optoelectronic Integrated Circuits, OEIC's)의 가장 주목받는 광소

자 중 하나가 되어왔다. Interdigitated back-to-back Schottky 접촉 구조를 가지는 MSM 광다이오드는 낮은 기생 capacitance를 가지며, 이것은 고속과 저잡음 동작의 잇점을 가지고 있다. 적절한 암전류 특성과 대역폭 특성을 가지는 large area MSM 광다이오드는 p-i-n구조를 대체해 fiber distributed data interface (FDDI), synchronous optical network (SONET), computer interconnects와 같은 많은 network과 interconnect 응용에 또한 유용하게 사용될 수 있다. Large area 검출기를 사용하는 것은 제작 공정 제한을 크게 완화시켜주며, 패키징동안에 정렬(alignment)

* 正會員, 서울대학교 工科大学 電氣工學部

(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

接受日字:1997年2月12日, 수정완료일:1997年5月6日

의 노력을 감소시켜준다.

1.3-1.55 μm 장파장 영역에서는 InP-InGaAs와 같은 작은 대역 간극을 갖는 물질이 MSM 제작에 사용될 필요가 있다. 하지만 InGaAs MSM 광다이오드의 경우 Schottky 장벽이 다소 낮아서(0.2eV) Schottky 접촉이 InGaAs위에 직접 형성되었을 때 과도한 누설 전류가 흐르는 문제가 있다.

그러나 최근에 Schottky 전극을 증착하기 전에 InGaAs위에 높은 schottky 장벽을 가지는 InAlAs의 고순도의 얇은 층을 성장시킴으로써 유효 장벽을 증가시켜서 누설 전류를 줄일 수 있음을 보였다^[11]. 여기서 InAlAs cap 층과 InGaAs 흡수층 사이에 존재하는 큰 전도대의 불연속성에 의한 전자 축적 효과는 두 층 사이에 composition graded 층을 첨가시킴으로써 해결될 수 있다^[2].

Large area MSM PD에 대한 이전의 연구들 중에 Hieronimy et al.^[13]는 350 μm 직경을 가지는 원주형 InGaAs MSM PD로 부터 1200 nA의 암전류, 0.8 pF의 capacitance, 그리고 0.95 GHz의 대역폭을 얻었다.

Yuang et al.^[4]은 암전류를 감소시키기 위하여 pseudomorphic InGaP 층을 사용하여 $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ 면적과 4 μm metal finger 간격으로부터 54 nA의 암전류, 0.84 pF의 capacitance 그리고 1.58 GHz의 대역폭을 얻었다.

본 논문은 1 μm InGaAs 흡수층을 가지는 InP 기판위에 격자정합된 InAlAs/InGaAs 이중접합구조를 사용한 2 μm , 4 μm , 6 μm 의 finger 간격을 가지는 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 의 large area MSM 광다이오드로 부터 얻어진 개선된 실험적 결과들을 보여준다.

$300 \times 300 \mu\text{m}^2$ 의 large active 면적 위에 4 μm finger spacing을 갖는 Cr/Au Schottky metal finger를 사용한 검출기는 10 V에서 38 nA의 낮은 암전류, 0.8 pF의 낮은 capacitance, 2.4 GHz의 높은 3-dB 대역폭을 나타낸다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2 장에서는 제작된 소자의 에피 구조 및 제작 과정을 간단히 설명하였다. 제 3 장에서는 소자의 전류-전압 및 capacitance-전압 특성을 보였다. 제 4 장에서는 본 소자로부터 얻어진 고속 특성을 분석하기 위하여 광전류에 대한 주파수 응답의 계산된 결과 및 측정된 결과를 비교 분석하였다.

Cr/Au		
Schottky enhancement	InAlAs	300Å
Composition grading	InAlAs/InGaAs SPSL	270Å
Photon absorption	InGaAs	1 μm
Composition grading	InAlAs/InGaAs	270Å
Buffer	InAlAs	3000Å
Substrate	InP:Fe	

그림 1. MSM 광다이오드의 에피층 구조

Fig. 1. Epi structure of the MSM photodiode.

II. 에피 구조 및 소자 제작 공정

본 논문에서 사용한 에피의 구조가 그림 1에 보여져 있다. 에피는 MBE로 Varian Gen II machine을 사용하여 시간당 0.8 μm 의 성장율로 500 $^{\circ}\text{C}$ 에서 반절연 <100> InP 기판위에 격자정합시켜 성장시켰다. 그림 1.에서 보듯이 에피층의 구조는 3000 Å InAlAs buffer 층, 270 Å composition graded InAlAs /InGaAs short period superlattice(SPSL) lower 층, 1 μm InGaAs 광흡수층, 270 Å composition graded InAlAs/InGaAs SPSL 그리고 300 Å InAlAs schottky barrier enhancement 층으로 구성되어 있다. 광 흡수층인 InGaAs층의 잔여 도핑 농도는 대략 10^{15}cm^{-3} 이다.

Composition grading이 없는 경우 InAlAs와 InGaAs사이의 큰 전도대 불연속성은 캐리어를 트랩하여 광전류의 응답시간을 증가시킬 것이다. 그러므로 InGaAs와 InAlAs사이에 첨가된 composition graded 층은 캐리어 트랩을 막고 광소자의 빠른 응답을 가능하게 한다.

MSM 광다이오드는 photo-lithography와 lift-off 공정을 사용하여 그림 1.의 에피위에 interdigitated finger 모양의 금속을 증착시킴으로써 제작되었다. MSM의 금속 접촉은 각각 1000Å과 200Å 두께의 Au와 Cr을 열증착하여 얻었는데, AZ5214 negative PR을 이용하여 패터하여 매우 깨끗한 선 가장자리를 얻을 수 있었다. 광다이오드의 면적은 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 이고 두 전극의 finger 간격과 finger 폭은 동일하며 각각 6 μm , 4 μm , 2 μm 인 소자를 제작하였다. 여기서 무반사 코팅은 하지 않았다.

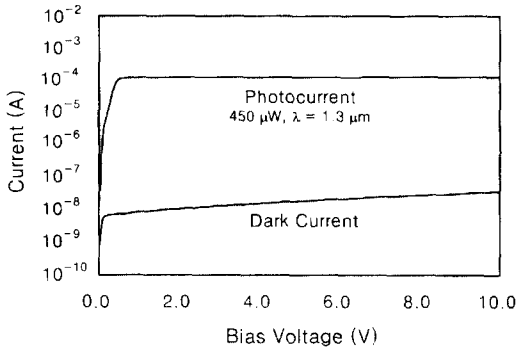


그림 2. MSM 광다이오드의 암전류 특성 및 광전류 특성
 Fig. 2. Dark and photo current characteristics for MSM PD.

III. 소자 측정 결과 : 전류-전압 및 Capacitance-전압 특성

1. 전류-전압 특성

제작된 MSM 다이오드의 I-V 특성은 HP 4145B parameter Analyzer를 사용하여 얻어졌다. 그림 2는 4 μm finger 간격을 가지는 MSM 광다이오드로부터 측정된 암전류와 광전류를 보여준다. 조광을 위해 450 μW optical power를 갖는 레이저가 사용되었다. 2, 4, 6 μm의 3개의 finger 간격을 가지는 MSM PD로부터 측정된 암전류로부터 계산된 암전류 밀도가 그림 3에 나타난다. 같은 그림 안에 본 논문이전에 얻어진 가장 좋은 암전류 밀도가 비교를 위해 포함되어 있다^[4]. 여기서 암전류밀도는 각 finger 간격에 대해 양극(=음극) metal 접촉 면적 21600 μm²으로 나눈 암전류로서 정의했다. 측정 결과로부터 field-induced barrier lowering 효과에 의해 finger 간격이 감소함에 따라 암전류 밀도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 암전류 밀도를 90000 μm²의 총검출 면적에 대한 암전류의 비로서 정의한다면 모든 소자가 1 pA/μm²이하의 암전류밀도를 가지는데, 이 결과는 지금까지 발표된 것 중에 가장 좋은 특성을 나타낸다. 그림 2.로부터 10 V에서 측정된 38 nA의 암전류는 0.42 pA/μm²의 암전류 밀도를 나타낸다. 이러한 좋은 특성은 InAlAs층의 Schottky barrier enhancement 효과와 흡수층의 매우 낮은 잔여 불순물 농도에 기인한다. 그림 2.에서 얻은 광전류는 1.3 μm 파장에서 0.3 A/W의 응답도를 나타낸다. 응답도는 무반사 코팅을 하면 개선할 수 있다. 그림 2

로부터 knee 전압이 암반응과 광반응 각각에 대해 0.3, 0.5V로서 매우 작은 것을 볼 수 있는데, 이것은 작은 바이어스 전압으로도 충분한 양자 효율을 얻도록 소자를 동작시킬수 있다는 것을 보여준다.

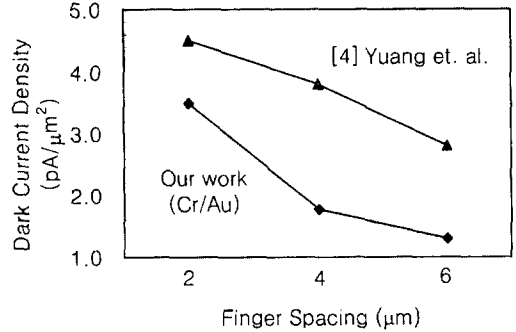


그림 3. 2, 4, 6 μm finger 간격을 갖는 MSM 광다이오드로부터 얻어진 암전류 밀도의 값. 이 논문이전에 얻어진 가장 좋은 실험 데이터와 비교되었다.

Fig. 3. Dark current density values from MSM PD's with 2, 4, and 6 μm finger spacing Comparison is made to the best experimental data obtained prior to this paper.

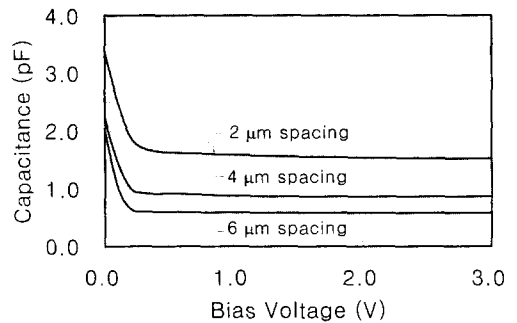


그림 4. 세 개의 다른 finger 간격을 가지는 MSM 다이오드로부터 얻어진 C-V 특성

Fig. 4. Capacitance-voltage characteristics obtained from MSM's with the three different finger spacings.

2. C-V 특성

평면 구조와 FET와의 호환성외에도 MSM의 interdigitated 전극 구조는 단위 면적당의 capacitance가 작은 특징을 갖는데 우리가 제작한 소자 역시 그러하였다. 그림 4는 1 MHz capacitance meter를 사용하여 측정된 MSM 광다이오드의 C-V 특성을 나타낸다. 이 그림에서 같은 면적에서 finger 간격이 증

가할수록 capacitance가 작아지는 것을 볼 수 있다. 1V에서 포화 capacitance의 값은 6, 4, 2 μm finger 간격 각각에 대해 0.6, 0.8, 1.5 pF이다. 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 의 넓은 면적을 가지는 광다이오드는 4 μm finger 간격의 경우 0.8 pF의 낮은 포화 capacitance값을 보여주며, 0.72 pF의 이론적인 값과 거의 일치한다. 모든 구조에서 capacitance가 0.3 V보다 낮은 바이어스에서 포화되는 것을 볼 수 있는데 이것은 InGaAs의 도핑이 낮아서 작은 바이어스에서도 완전히 공핍되기 때문이다. 실험으로부터 얻은 낮은 바이어스에서의 낮은 포화 capacitance로부터 좋은 주파수 응답이 얻어질 수 있다.

IV. 소자 측정 결과 : 주파수 특성

속도 또는 대역폭 제한에 대한 대부분의 MSM 광다이오드의 결과는 펄스 응답 측정에 의한 것이다. 여기서 측정된 임펄스 응답은 trailing edge에 대해 긴 tail을 나타내는 경우가 많고 이것은 실제적인 대역폭을 결정하는 것을 어렵게 만든다^[5]. 제작된 MSM 광다이오드는 optical-to-electrical 대역폭의 측정을 위하여 시간 영역에서가 아닌 주파수 영역에서 직접적으로 측정되었다.

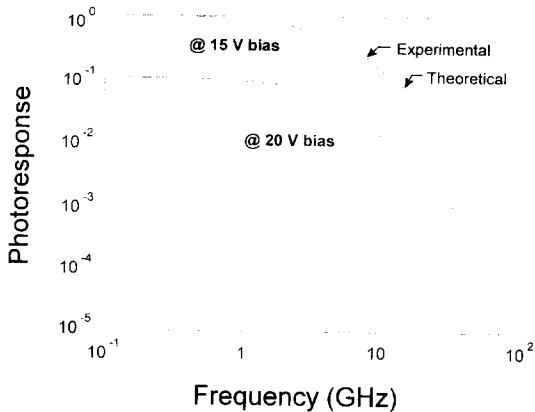


그림 5. 두 개의 다른 바이어스에서 MSM 광다이오드의 광전류에 대한 주파수 특성

Fig. 5. Frequency characteristics for the photocurrent of MSM photodiode at two different bias voltages.

그림 5에 4 μm finger 폭과 finger 간격을 갖는 제작된 MSM 광다이오드의 optical-to-electrical 대역

폭을 보였다. 소자의 주파수 응답을 얻기위하여 파장이 1550 nm인 레이저가 사용되었다. 4 μm 간격을 갖는 MSM PD는 20 V 바이어스에서 전기적인 3-dB 대역폭이 2.4 GHz로 측정되었고 15 V 바이어스에서는 1.8 GHz를 나타내었다. 그림 5.에서 보였듯이 두 개의 다른 바이어스에 대해 이론적으로 fitting된 응답곡선은 RC 시간과 주행시간을 둘 모두 고려하여 계산되었고, 이론적인 데이터와 실제 측정 데이터가 상당부분 일치함을 보인다. MSM 소자의 주파수특성은 공핍층 밖에서 캐리어가 벗어나는 데 걸리는 확산에 의한 전하의 흐름을 무시한다면 주로 주행 시간과 RC_{MSM} 시간에 의해 결정된다. 계산된 주파수 응답은 다음식에 따르며 이 결과를 그림 5.에 측정치와 함께 보였다.

$$H_{\text{total}}(\omega) = |H_b(\omega) \times H_{RC}(\omega)| \quad (1)$$

RC 시간을 고려한 전달함수 $H_{RC}(\omega)$ 는 $\frac{1}{1+j\omega\tau_{RC}}$ 로 주어진다. 여기서 소자의 RC 시상수, τ_{RC} , 는 $(R_s + R_D)C_{\text{MSM}}$ 이다. 여기서 C_{MSM} 은 MSM 광다이오드의 금속 전극에 의한 정전용량이고, R_s 는 직렬 저항, R_D 는 부하저항이다. Finger 간격이 고정된 경우 MSM 광다이오드의 캐리어의 주행시간은 바이어스를 증가시키면 따라 캐리어가 포화 속도에 도달할 때까지 계속 감소하게된다. τ_{RC} 의 영향때문에 실제 측정된 대역폭 값은 주행 시간에 의한 영향만 고려한 경우에 비해 상당히 감소하게 되므로 더 나은 주파수 특성을 위해서는 C_{MSM} 의 작은 값이 요구되며 금속 finger의 직렬 저항 R_s 도 금속의 두께와 폭에 많은 영향을 받으므로 주의 깊게 결정되어야 한다. 모델에 사용한 Capacitance값은 0.8 pF의 측정된 값을 사용했다. 그리고 실제 측정된 주파수 특성 데이터의 fitting으로부터 직렬 저항 값을 얻었으며 그것이 타당함을 실제 측정된 값과의 비교를 통해 검증하였다. 여기서 최적의 fit을 위한 직렬 저항값은 28 Ω 이고 이는 측정치인 27.83 Ω 과 잘 일치한다. 또 이를 측정 capacitance 값(0.8 pF)에 적용하면 τ_{RC} 는 62.4 psec가 되어 RC 시상수에 의한 대역폭은 2.55 GHz가 된다.

한편, (1)식에서 $H_b(\omega)$ 은 주행 시간을 고려한 전달함수이며 수광 영역을 얇은 segment들로 나누어 그들 각각에 대하여 전류 연속 방정식을 세워 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다^[6].

$$H_{tr}(\omega) = \frac{1/\theta}{a_n + j\omega\tau_{re}} \left(\frac{e^{a_n + j\omega\tau_{re}} - 1}{a_n + j\omega\tau_{re}} - 1 \right) + \frac{1/\theta}{a_p + j\omega\tau_{rh}} \left(\frac{e^{a_p + j\omega\tau_{rh}} - 1}{a_p + j\omega\tau_{rh}} - 1 \right) \quad (2)$$

여기서 τ_{re} 와 τ_{rh} 는 유효 전자 및 홀 주행시간이며, a_n 과 a_p 는 각각 lifetime에 대한 주행시간의 비이고 $\theta = [\exp(a_p) - 1]/a_p^2 - 1/a_p + [\exp(a_n) - 1]/a_n^2 - 1/a_n$ 이다. 식(2)의 두 괄호 속에 존재하는 분자항들은 주파수 응답에 반복적인 zero, pole이 생길 것을 말해주고 있다. 실제 그림 5.의 이론적인 응답곡선은 고주파 영역에서의 반복적인 pole, zero의 영향을 반영하고 있다.

주파수 응답의 계산된 결과를 얻기 위하여 바이어스에 대해 홀과 전자에 대한 속도와 lifetime의 타당한 값을 가정하고 RC 시간 모델을 위한 저항값을 구한 다음 더 나은 fitting을 얻기 위해 속도 변수들을 조정하였다. 이와 같은 과정은 가장 좋은 fitting이 얻어질 때까지 반복되었다. 여기서 최적의 fitting으로부터 얻어진 전자와 홀의 속도들은 20 V 바이어스에 대해 $v_n = 7.9 \times 10^6$ cm/sec, $v_p = 4.3 \times 10^6$ cm/sec 이었으며, 15 V에 대해서는 $v_n = 9.9 \times 10^6$ cm/sec, $v_p = 3.0 \times 10^6$ cm/sec이었다. 이 값들은 이미 발표된 InGaAs에서의 캐리어들의 표동 속도 모델과 잘 일치한다¹⁷⁾. 낮은 주파수에서 주파수 응답이 degrade되지 않음은 SPSL 층이 효과적으로 이종접합계면에서의 캐리어 트랩을 제거해준 것으로 추정된다. 여기서 측정된 대역폭 값 역시 유사한 조건에서 측정된 값들보다 비슷하거나 우수하다^{13) 14)}.

V. 결 론

본 논문은 1 μm InGaAs 흡수층을 가지는 InP 기판위에 격자정합된 InAlAs/InGaAs 이종접합구조를 사용한 2 μm , 4 μm , 6 μm 의 finger 간격 (=finger 폭)을 가지는 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 의 large area MSM 광다이오드로부터 얻어진 개선된 실험적 결과들을 나타낸다. InAlAs Schottky barrier enhancement 층, 순도 높은 InGaAs 흡수층을 사용하여 매우 낮은 압전류 특성과 좋은 대역폭 특성을 나타내는 고성능 InGaAs MSM 광다이오드를 보였다. 또한 주행시간 캐리어 전송 모델과 RC 등가모델을 사용하여, 소자의 주파수 특성을 분석하였다. 이 모델을 사용하여 직렬 저

항, 홀과 전자의 주행시간이 측정된 MSM 광다이오드의 주파수 응답 특성으로 부터 결정되었다. 4 μm finger 간격을 가지는 $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ 소자로부터 얻어진 38 nA의 암전류, 0.8 pF의 capacitance, 그리고 2.4 GHz의 전기적인 대역폭은 현재까지 발표된 MSM 광다이오드에 대한 결과중 가장 우수하다.

더욱 우수한 성능을 갖는 고속 소자를 만들기 위해서는 작은 면적을 갖는 MSM 광다이오드를 제작할 필요가 있다. $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ 의 large area MSM 광다이오드로 부터 얻어진 광다이오드의 결과들로부터 우리의 에피 구조로 만들어진 작은 구조의 MSM 광다이오드는 또한 우수한 특성을 보여주리라 예측할 수 있다. 작은 면적을 갖는 MSM 광다이오드는 RC charging 시간에 의한 효과보다 캐리어의 주행시간에 의한 효과가 더 커질 것이다.

Acknowledgement

※ 주파수 응답 측정에 도움을 준 벨 연구소의 J. M. M. Rios, L. M. Lunardi 박사에게 감사합니다.

참 고 문 헌

- [1] J. B. D. Soole, and H. Schumacher, "InGaAs metal-semiconductor metal photodetectors for long wavelength optical communications," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, no. 3, pp. 737-752, 1991.
- [2] H. T. Griem, S. Ray, J. L. Freeman, and D. L. West, "Long wavelength (1.0-1.6 μm) $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}(\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x})_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ metal-semiconductor-metal photodetector," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, pp. 1067-1068, 1990.
- [3] F. Hieronymi, E. H. Böttcher, E. Dröge, D. Kuhl, St. Kollakowski, and D. Bimberg, "Large-area low-capacitance InP/InGaAs MSM photodetectors for high-speed operation under front and rear illumination," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 15, pp. 1247-1248, 1994.
- [4] R.-H. Yuang, H.-C. Shi, Y.-J. Chien, Y.-J. Chan, J.-I. Chyi, W. Lin, and Y.-K. Tu, "High-Performance Large-Area InGaAs

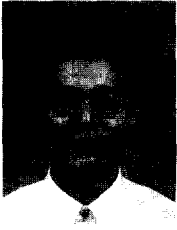
MSM Photodetectors with a Pseudomorphic InGaP Cap Layer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 8, pp. 914-916, 1995.

- [5] D. Kuhl, F. Hieronymi, E. H. Böttcher, T. Wolf, D. Bimberg, J. Kuhl, and M. Klingenstein, "Influence of Space Changes on the Impulse Response of InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, no. 6, pp. 753-759, 1992.

- [6] J. W. Chen, D. K. Kim, and M. B. Das, "Transit-Time Limited High-Frequency Response Characteristics of MSM Photodetectors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 43, no. 11, pp. 1838 - 1843, Nov. 1996.

- [7] Julian B. D. Soole and Hermann Schumacher, "Transit-time limited frequency response of InGaAs MSM photodetectors," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 37, pp. 2285-2291, 1990.

저 자 소 개



金正培(正會員)

1969년 9월 16일생. 1993년 8월 경북대학교 전자공학과 학사, 1997년 2월 서울대학교 전자공학과 석사. 1997년 2월 ~ 현재 LG 종합기술원 연구원. 주관심 분야는 광수신소자 및 광집적회로, Electro-Luminiscence 등임.

金紋廷(正會員) 第 32卷 A編 第 11號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 박사과정 재학중

金成俊(正會員) 第 32卷 A編 第 11號 參照

현재 서울대학교 전기공학부 부교수