

광 효과를 이용한 GaAs MESFET의 광 제어

(Optical Control of GaAs MESFET with Optical Effect)

李 承 燁*, 張 隴 聖*, 文 浩 元**, 朴 漢 奎*

(Sung Yup Rhee, Young Seong Chang, Ho Won Moon, and Han Kyu Park)

要 約

본 논문에서는 GaAs 반도체 화합물 소자가 지니고 있는 여러 성질 중에서 광효과를 이용하여 GaAs MESFET를 수광 소자 및 광에 의한 증폭기 이득 제어 실험을 함으로써 마이크로파 소자인 GaAs MESFET가 광학적 소자로 공유되어 사용할 수 있음을 확인하였다.

광 효과에 대한 기본적 실험으로서, GaAs MESFET에 광을 입사하였을 때 광 유기 전압으로 인해 발생하는 드레인 전류, S-파라미터의 변화를 측정하였으며, 마이크로파 증폭기를 제작하여 광에 의해 변화되는 증폭기의 이득 변화를 측정하였다.

Abstract

In this paper, using optical effect of characteristics of GaAs compound, two potential application of optical controlled GaAs MESFET are demonstrated; detector, microwave amplifier gain control.

These lead to the possibility of the interaction with optical devices.

The preliminary experiments show the light induced voltage, the increase in the drain current and the change in the microwave scattering parameters of GaAs MESFET under optical illumination (He-Ne laser).

And microwave amplifier gain is found to be varied with changing in intensity of optical illumination.

I. 서 론

최근 반도체와 광 섬유 기술의 발전으로 광 통신 신호 주파수 대역이 점차 마이크로파 신호 주파수 대역으로 높아지는 추세에 따라 마이크로파 소자와 광 소자로서 공유될 수 있는 소자의 필요성이 대두

되고 있다.

이에 따라 광에 의해 스위칭, 신호의 크기 및 위상, 주파수등을 쉽게 제어할 수 있고 수광 및 증폭을 동시에 할 수 있는 GaAs MESFET 소자가 각광을 받기 시작하였다.

이와 같은 마이크로파 소자의 광학적 제어는 기계적이나 전기적으로 제어하는 것보다 RF 신호나 전자파 간섭을 받지 않을 뿐만 아니라 소형, 경량화 시킬 수 있는 장점을 갖고 있다.

마이크로파 소자의 광에 의한 광학적 제어는 1977년 C. Baak¹⁾ 등이 GaAs MESFET를 고속 수광 소자로 실험한 이래로 이에 대한 응용 분야를 넓혀

*正會員, 延世大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

**正會員, 韓國電氣通信公社 品質保證團

(Korea Telecommunication Authority, Quality Assurance Office)

接受日字: 1989年 7月 18日

으며, 1987년에는 R. B. Darling^[2] 이 광이득 메카니즘을 연구하였다.

본 논문에서는 일반적으로 상용되고 있는 GaAs MESFET인 NE72083을 이용하여 수광 소자와 마이크로파 증폭기의 이득 제어 실험을 하였다.

또한 수광 소자로서의 성능 비교를 위해 PIN 다이오드인 HP4220을 이용하였고 증폭기의 바이어스 조건에 따라 광에 의한 마이크로파 증폭기의 스위칭 실험을 하였다.

II. GaAs MESFET의 광 효과

MESFET에 게이트 바이어스 전압 V_{gs} 와 드레인 소오스 전압 V_{ds} 를 인가하였을 때, 드레인 소오스 간에 흐르는 전류 I_{ds} 는 식 (1) (3)과 같이 표현되며,

$$I_{ds} = \frac{q\mu nWd}{l} \left[V_{as} - \frac{2}{3} V_p^{1/2} \{ (V_{as} + V_b - V_{gs})^{3/2} - (V_b - V_{gs})^{3/2} \} \right] \quad (1)$$

여기서, μ 는 전자의 이동도 (Cm/V.s ec), W 는 게이트의 폭, l 은 게이트의 길이, V_b 는 Schottky장벽의 built-in전압, 그리고 V_p 는 활성영역을 완전하게 공핍시키는데 요구되는 핀치오프 전압을 나타내며, 식 (2)와 같이 나타내어진다.

$$V_p = \frac{qnd^2}{2\epsilon_0\epsilon_r} \quad (2)$$

MESFET에 그림 1과 같이 광을 입사 시키면 n

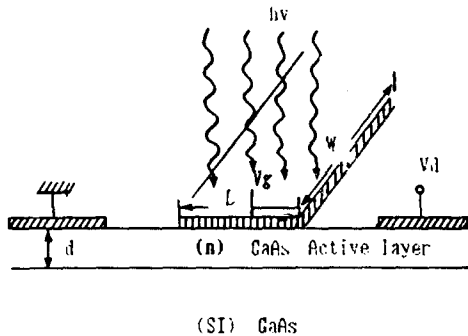


그림 1. GaAs MESFET의 광 입사 구조도
Fig. 1. Schematic diagram of a light-illumination into GaAs MESFET.

형 채널 MESFET인 경우, 입사 광은 소수 캐리어인 호일(hole)의 농도를 증가 시킨다.

호일 농도에 있어서 이러한 증가 ΔP 는 $d \ll l$ 인 조건이 만족되면, d 에 비례한다. 수식적으로 ΔP 는 식 (3)과 같이 표현 된다.

$$\Delta P = \frac{\tau}{d} \left(\frac{P_{opt} \lambda}{hc} \right) (1 - e^{-\alpha d}) \quad (3)$$

여기서, h : 플랑크 상수, P_{opt} : 입사광의 세기
 λ : 입사 광의 파장,
 α : 반도체의 광 흡수 계수
 c : 광속, τ : 소수 캐리어의 수명
 d : 활성영역의 두께,

식 (3)의 [] 부분은 단위 시간당 단위 면적에 입사되는 파장 인 광자의 수를 나타낸다. 게이트와 드레인 사이의 공핍층에서 입사광에 의해 발생하는 캐리어는 채널내의 전계에 의해 가속되어 드레인과 게이트 사이의 광 전류의 원인이 된다. 이렇게 생긴 게이트 전류는 게이트 저항에서 전압 강하되어 게이트 전압을 변화시키게 된다.

이때, 광에 의해 유기하는 전압 V_{th} [4]는 식 (4)와 같이 나타내어지며,

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{P + \Delta P}{P} \right) \quad (4)$$

여기서 P 는 평형 상태하에서의 소수 캐리어 농도이고, K 는 볼츠만 상수, T 는 온도 (K), q 는 전하이다.

결과적으로, V_{th} 에 해당되는 전압원을 게이트에

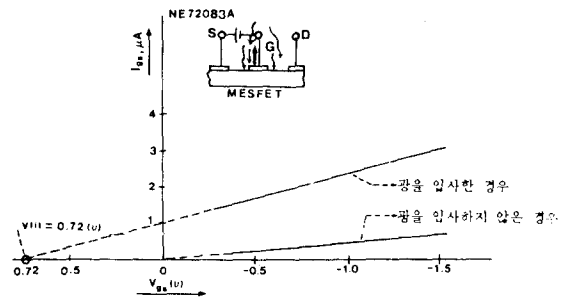


그림 2. 광에 의하여 유기된 전압 (V_{th}) 측정 (입사광의 세기 : $0.8mW/mm^2$)

Fig. 2. Measured I_g versus V_{gs} for GaAs MESFET from which V_{th} is obtained (Light intensity : $0.8mW/mm^2$).

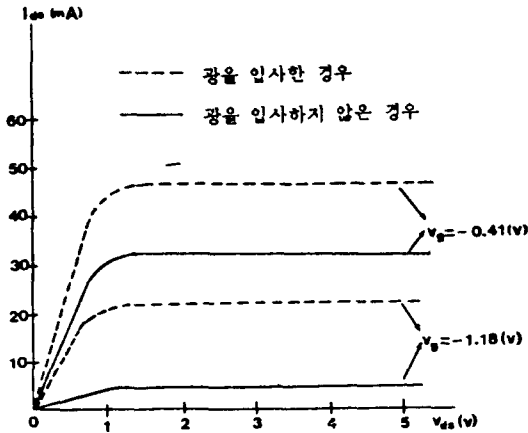


그림 3. 광 입사에 따른 드레인 전류 특성변화 측정
Fig. 3. Measured I_{ds} versus V_{ds} for GaAs MESFET with and without optical illumination.

순 바이어스를 가하는 것과 같은 효과를 나타내며, 게이트에서의 총 전압은 게이트 바이어스 V_{gs} 와 V_{int} 의 중첩과 같다.

그림 2에서는 632.8nm인 He-Ne 레이저 광 ($0.8\text{mW}/\text{mm}^2$)를 GaAs MESFET의 광센서부에 입사하였을 때 광에의해 유기되는 전압을 측정하여 그 결과를 나타내었다.

여기서, V_{int} 의 결정은 드레인을 개방한 상태에서 게이트와 소오스 사이에 역 바이어스 전압 V_{gs} 를 인가하고 V_{gs} 의 값에 대한 게이트 전류 I_g 를 측정하여 그림으로 나타내고 횡축과 만나는 점이 바로 구하고자 하는 광 유기 전압이다. 이때 $0.8(\text{mW}/\text{mm}^2)$ 의 광이 유기한 전압 V_{int} 는 $0.72(\text{V})$ 로 관측되었다.

그림 3에서는 $V_{gs} = -0.41(\text{V})$ 와 핀치 오프 조건 하에서 광을 입사하지 않았을 때와 입사한 경우의 드레인 전류 변화를 나타내었다.

이 그림3에서 알 수 있는 바와 같이 약 $1(\text{mW}/\text{mm}^2)$ 의 아주 적은 양의 광을 입사하더라도 드레인-소오스 전류 I_{ds} 는 상당히 많이 변화함을 보여 준다.

III. 광 입사시 GaAs MESFET 소자의 수광 및 RF 특성 변화

(1) 수광 특성

GaAs MESFET를 수광소자로서의 성능을 살펴 보기 위하여 그림 4와 같은 시스템을 구성한다.

광을 Intensity modulation시키기 위해 광 음향 변

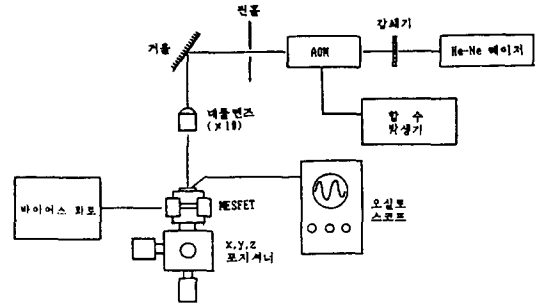


그림 4. GaAs MESFET의 수광 성능 측정 시스템
Fig. 4. Measurement system for testing detection of GaAs MESFET.

조기 (AOM)를 이용하였다. AOM에서 나온 광을 Pinhole를 사용하여 +1차 회절광만을 통과시킨 다음 대물렌즈 (X10)를 거쳐 광을 수광부(광센서부)인 게이트와 드레인 사이에 집속하여 입사시켰다.

이 때 Oscilloscope와 전류계를 이용하여 광에 의하여 변화된 드레인 전압과 드레인 전류를 측정하였으며, 수광소자로서의 성능을 비교하기 위하여 PIN 다이오드 (HP4220)를 같은 조건하에서 실험하였다.

그림 5는 입사광을 AOM를 이용하여 $100(\text{Hz})$ 에서 부터 $1(\text{MHz})$ 까지의 광변조된 Pulse신호로 되게 한 다음, 각각의 주파수에서 바이어스 조건을 달리 하며 얻은 V_{ds} 의 변화값을 나타낸 결과이다.

여기서, 선형영역과 포화영역에서 V_{ds} 변화량은 약 $300(\text{mV})$ 의 차이를 보여, 포화영역에서는 광전류 (Photo current)^[5]보다 광전압 (Photo-voltaic)^[6]에 의해 광이득 메카니즘이 이루어짐을 알 수 있다.

그림 6은 PIN 다이오드와 성능을 비교한 것으로서 측정 주파수 대역에서 PIN 다이오드보다 최대 6배 큰 출력 파형을 얻었다.

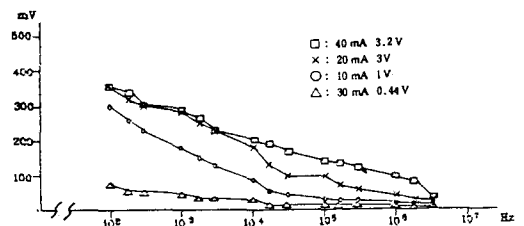
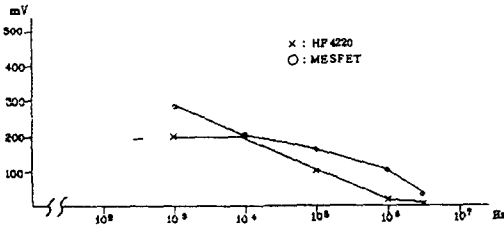


그림 5. 바이어스 조건에 따른 V_{ds} 변화량 (광량 : 0.15mW)

Fig. 5. Variation of V_{gs} with bias conditions.



* HP4220 : Hewlett Packard사의 수광 소자로 최대주파수 1GHz 양자효율 0.8%인 PIN다이오드

그림 6. GaAs MESFET와 PIN diode (HP4220)의 수광 성능 비교

Fig. 6. Comparison of detection performance of GaAs MESFET with PIN diode (HP4220) ($P_{opt} = 0.15 \text{ mW/mm}^2$)

(2) S-파라미터의 변화

GaAs MESFET를 자체 제작한 test-fixture에 고정하고 게이트 바이어스 V_{gs} 의 여러 값에 대하여 광 센서부에 입사한 경우와 광을 입사하지 않은 경우에 Wiltron 360 Vector Network Analyzer로 1~15GHz 범위에서 측정된 S21 (이득)을 그림 7에 나타내었다.

여기서 드레인 전압은 3 (V)를 인가하였으며 광에 의한 이득변화는 V_{gs} 를 -0.5 (V)에서 -1.5 (V) 사이의 여러 값에 대하여 마커 2, 즉 4.0 (GHz) 에서 0.3 ~ 25 (dB) 까지 증가되었다.

또한 광 입사에 따른 이득 증가에 있어서 소자를 편치오프 전압 근처에 바이어스 시킬 때 25 (dB)로 가장 크게 증가되었다. 더구나 이득 S21의 위상은 그림 8에서와 같이 광을 입사시켜도 변화가 거의 없었다.

그림 9는 S11과 S22의 변화를 관측한 것으로 광에 의해 거의 영향을 거의 받지 않음을 알 수 있다.

IV. MESFET 증폭기의 이득제어 및 결과 고찰

광을 입사하면 III장의 실험 결과에 의해 S21의 크기 (magnitude)가 크게 변화하므로 MESFET 증폭기의 이득을 제어할 수 있다.

제작한 증폭기의 광응답 특성을 살펴보기 위하여 그림 10과 같은 장치를 구성한다.

바이어스 전압 $V_{ds} = 3 \text{ (V)}$, $I_{ds} = 10 \text{ (mA)}$ 인 상태에서 $2 \text{ (mW/mm}^2\text{)}$ 의 DC광 (632.8nm, He-Ne Laser)을 입사하면, 약 10 (dB)의 이득이 감소하였고 또한 입출력 반사계수는 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 약간 증가되었다. 그러나 pinch-off가 되도록 바이어

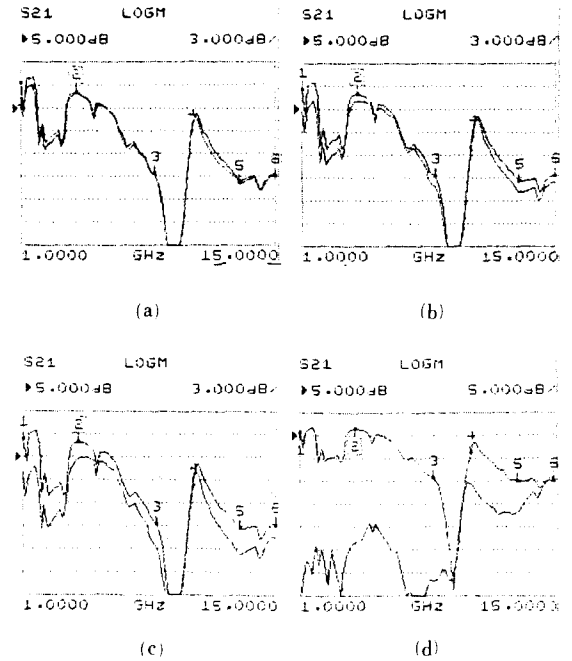
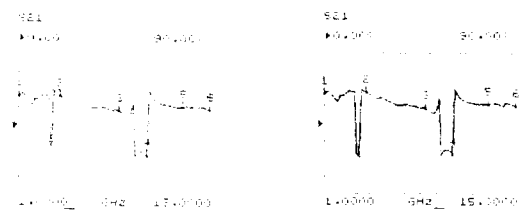


그림 7. 광에 의한 GaAs MESFET 소자의 S21 (이득) 변화 ($P_{opt} = 1 \text{ mW/mm}^2$)
 Fig. 7. S21 (gain) variation of GaAs MESFET by light-illumination.
 (a) $V_{gs} = -0.5 \text{ (V)}$, (b) $V_{gs} = -0.9 \text{ (V)}$,
 (c) $V_{gs} = -1.0 \text{ (V)}$, (d) $V_{gs} = -1.5 \text{ (V)}$.

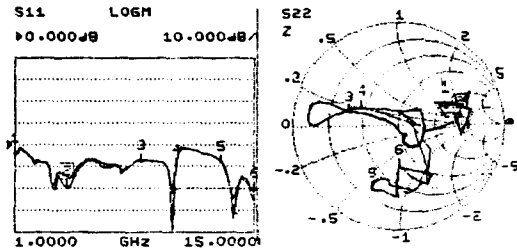


(a) 광을 입사하지 않은 경우 (b) 광 입사시

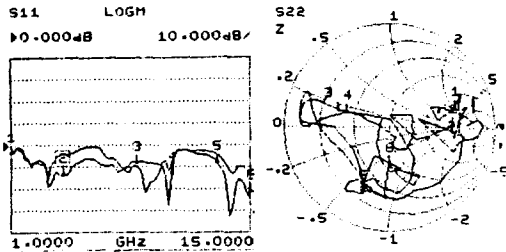
그림 8. 광을 입사한 경우 GaAs MESFET의 S21의 위상

Fig. 8. Phase of S21 with optical illumination for GaAs MESFET. [$V_{ds} = 3 \text{ (V)}$, $V_{gs} = -1.5 \text{ (V)}$, $P_{opt} = 1 \text{ (mW/mm}^2\text{)}$]

스를 인가하면, 이득은 약 26 (dB) 증가하였고 입출력 반사계수는 감소되었다. 이에 대한 결과는 그림 11과 같다.



(a) $V_{gs} = -0.0 (V)$,



(b) $V_{gs} = -1.5 (V)$

그림 9. GaAs MESFET의 입출력 반사 계수 S11, S22 측정

Fig. 9. Measured S11, S22 of GaAs MESFET ($V_{ds}=3V$, $P_{opt}=1mW/mm^2$).

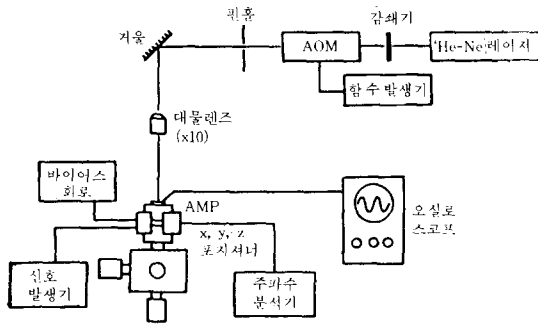


그림10. MESFET증폭기의 이득제어 실험 장치
Fig.10. The system for gain control of a GaAs MESFET amplifier.

위의 두가지 대표적인 바이어스 조건에서, 인가한 바이어스 조건을 달리함으로써 광에 의한 증폭기 이득 변화량도 또한 달라짐을 알 수 있다. 그림 11의 (c), (d)의 결과를 살펴보면 바이어스를 pinch-off에 설정함으로써 증폭기를 ON, OFF(스위칭)할 수 있음을 알 수 있다. 또한 광량에 따른 이득 변화는 AM

표 1. S파라미터 변화

Table 1. The variation of S-parameter.

바이어스	이득 S21(dB)		S11(dBm)		S22(dBm)	
	0 (mW)	2 (mW)	0(mW)	2 (mW)	0 (mW)	(2 (mW)
pinch-off	-21	5	5.8	3.8	8.17	3.78
$V_{ds}=3(V)$ $I_{ds}=10(mA)$	10.34	0.78	2.12	2.88	1.46	1.52

변조기^[7]로 응용 가능함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 GaAs MESFET의 광효과(optical effect)를 이용하여 일반적으로 상용하고 있는 GaAs MESFET인 NE72083를 수광 소자와 광에 의한 증폭기의 이득을 조절하는데 사용함으로써 새로운 수광 소자의 영역과 광에 의한 마이크로파 증폭기의 이득을 제어할 수 있음을 확인하였다.

실험 결과 광에 의해 GaAs MESFET의 DC 및 RF 특성변화는 바이어스를 pinch-off영역에 설정함으로써 큰 변화량을 측정하였다.

이 결과는 Sugeta가 제안한 광 응답 메카니즘에 의한 해석과 잘 일치가 된다.

수광소자로서 AOM으로 광을 Intensity Modulation시켜 주파수에 따른 수광 소자 성능은 포화 영역에 바이어스를 걸어줌으로써 PIN다이오드(HP4220)와 비교하여 최대 6배 증가된 파형을 측정할 수 있었으며, 또한 이득 제어 실험에서는 pinch-off에 바이어스를 인가했을 때 최대 24dB의 이득 변화량을 얻었으므로 마이크로파 증폭기를 광에 의해 스위칭하는 데도 응용 가능함을 보였다.

그러므로, GaAs MESFET를 수광 소자로 광 전송 시스템에 이용하려면 바이어스를 포화 영역내에 놓이도록 하고 마이크로파 증폭기나 발진기를 제어할 시에는 pinch-off 영역에 바이어스를 정함으로써 효율적인 제어를 수행할 수 있음을 알 수 있다.

앞으로, 광에 의한 GaAs MESFET 특성 변화에 대한 정확한 메카니즘이 밝혀지고, 광효과를 높이기 위해 광 센서부(게이트와 드레인 사이의 영역)의 크기를 크게 하거나, 광 섬유를 직접 광 센서 부에 연결한다면 high bit rate의 광통신 시스템이나 광 신호 처리뿐만 아니라 수 μW 의 미소한 광량으로 마이크로파 증폭기 및 발진기의 안정화(optical injection locking)^[8]에도 효율적인 응용이 기대된다.

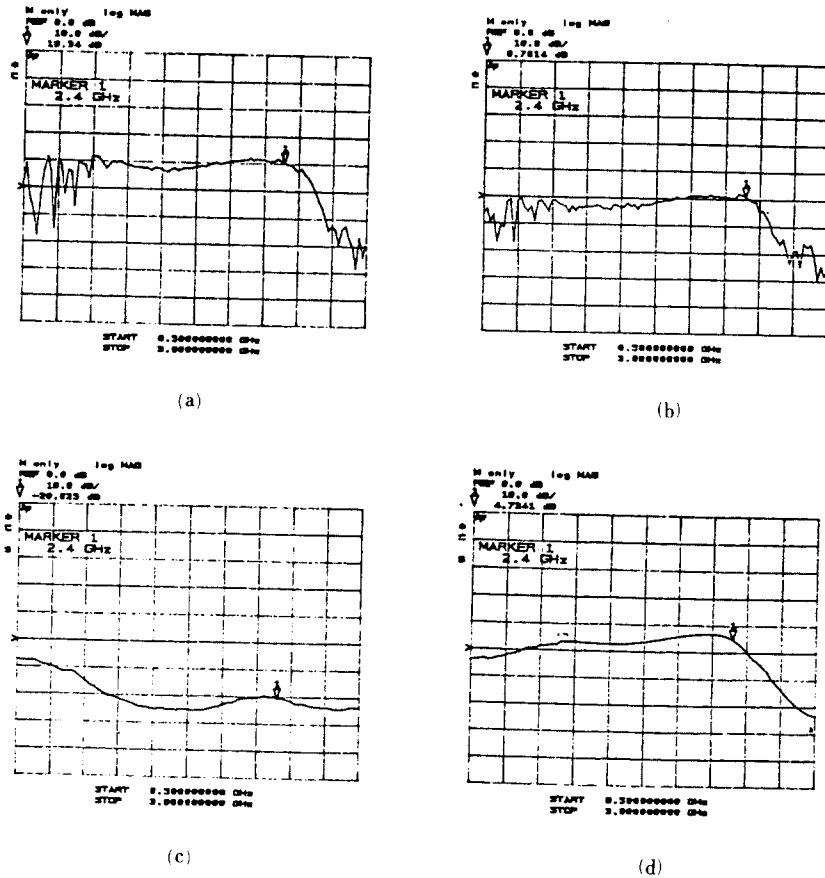


그림 11. 광에 의한 증폭기 이득 변화

Fig. 11. The gain variation of a GaAs MESFET amplifier with optical illumination.

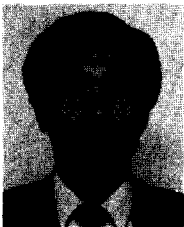
- (a) $V_{ds}=3(V)$, $I_{ds}=10(mA)$.
- (b) $V_{ds}=3(V)$, $I_{ds}=10(mA)$, $P_{lit}=2(mW/mm^2)$.
- (c) pinch-off.
- (d) pinch-off, $P_{opt}=2(mW/mm^2)$.

參 考 文 獻

- [1] C. Baak, G. Elze, and G. Walf, "GaAs MESFET: A high-speed optical detector," *Electron. Lett.*, vol. 13, pp. 193, 1977.
- [2] Robert B. Darling, Jc'ui P. Uyemura, "Optical gain and Large-signal characteristics of illuminated GaAs MESFET's," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-23, pp. 1160-1170, July, 1987.
- [3] S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed. New York: Wiley, 1981.
- [4] Rainee N. Simons, "Analysis of optically controlled microwave/millimeter-wave device structures," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-34, pp. 1349-1355, December, 1986.
- [5] E.H. Hara and R.I. Macdonald, "Characteristics of a photoconductive detector as an optoelectronic switch," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-19, pp. 101-105, 1983.
- [6] T. Sugeta and Y. Mizushima, "High speed photoresponse mechanism of a GaAs

- MESFET”, Japan J. Appl. Phys., vol. 19, pp. L27-L29, 1980.
- [7] H. Mizuno, “Microwave Characteristics of an optically-controlled GaAs MESFET,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-34, pp. 596-600, 1983.
- [8] A.S. Daryoush, “Comparison of Indirect optical injection-locking techniques of multiple X-Band oscillators,” *IEEE, vol. MTT-34*, pp. 1363-1370, December, 1986.

著 者 紹 介



文 浩 元 (正會員)

1959年 1月 7日生. 1980年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업. 1986年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과. 1986年~현재 연세대학교 대학원 박사과정. 1986年~현재 한국전기통신공사 품질보증

단 연구원. 주관심분야는 마이크로파 소자의 광제어 특성 등임.



張 隴 聖 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정중

李 承 燁 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정중



朴 漢 奎 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 연세대학교 전자공학과 교수