

논문 2004-41SD-3-3

단채널 GaAs MESFET의 DC 특성 및 광전류 특성의 해석적 모델에 대한 연구

(Analytical Modeling for Dark and Photo Current Characteristics
of Short Channel GaAs MESFETs)

김 정 문*, 서 정 하**

(Jeong-Moon Kim and Chung-Ha Suh)

요 약

본 연구는 게이트 매몰형 단채널 GaAs MESFET의 암전류 특성과 광전류 특성을 해석적으로 모델링하였다. 모델링 결과, 광조사에 의한 중성영역내의 광 전도도의 증가 보다 공핍층 내의 광 기전력 발생에 따른 공핍층 폭의 감소효과로 인한 드레인 전류의 증가가 크게 일어남을 보이고 있다. 중성영역의 캐리어 밀도 변화는 1차원 캐리어 연속 방정식으로부터 도출하였으며, 광 기전력 도출은 게이트-공핍층 경계면의 광전류와 열전자 방출전류가 상쇄되는 조건으로 도출하였다. 드레인전압 인가에 따른 단채널 소자의 채널 방향의 전계효과를 고려한 2차원 Poisson 방정식의 해법을 제안하였다. 모델링 결과를 시뮬레이션한 결과, 적절한 암전류 및 광전류 특성에 대한 통합적 모델이 얻어짐을 확인하였다.

Abstract

In this paper, an analytical modeling for the dark and photo-current characteristics of a buried-gate short-channel GaAs MESFET is presented. The presented model shows that the increase of drain current under illumination is largely due to the increase of photo-conductivity in the neutral region but the narrowing effect of the depletion layer width. The carrier density profile within the neutral region is derived from solving the carrier continuity equation one-dimensionally. In deriving the photo-generated current, we assume that the photo-current is compensated with the thermionic emission current at the gate-channel interface. Moreover, the two-dimensional Poisson's equation is solved by taking into account the drain-induced longitudinal field effect. In conclusion, the proposed model seems to provide a reasonable explanation for the dark and photo current characteristics in a unified manner.

Keywords : GaAs MESFET/ OPFET 광특성

I. 서 론

1. 연구배경

광 수신단에서 사용되는 광소자의 특성은 광시스템 전체의 성능을 근본적으로 결정하는 중요한 척도이다.

전송속도가 수Gbps 이상이 되면 속도뿐만 아니라 수신단에서의 수신감도가 매우 중요한 요소로 작용하고, 이러한 수신감도의 향상을 위해 초기에는 내부이득을 갖는 APD(Avalanche Photo Detector) 광수신소자에 관한 연구가 진행되었다. APD는 PIN-PD보다 수신감도가 우수하고 경제적인 장점도 있어 JDS Uniphase에서 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) 구조에 적합한 2.5Gbps급 및 10Gbps급에 적용 가능한 APD의 개발을, Itzler등은 InGaAs를 기반으로 하는 평판형 Bulk-InP APD를 개발하였고^[1], 일본의 NEC에서는 10 Gbps 광수신기 모듈에 응용할 고속 평판형 초

* 정회원, 제주산업정보대학 정보통신과
(Department of information and telecommunication, Jeju college of technology)

** 정회원, 홍익대학교 전자전기공학부
(School of Electronics and Electrical Eng. Hongik University)

접수일자 : 2003년7월14일, 수정완료일 : 2004년3월4일

격자 APD를 개발하였다^[2].

한편, GaAs MESFET을 광검출기로 응용하기 위한 시도로서 GaAs MESFET에 광을 인가하였을 때의 전기적 특성 해석에 관한 여러 연구가 최근까지 진행되고 있다. 최근 연구에서 MESFET의 최적 잡음지수가 광으로 바이어스 되었을 때 현저하게 감소한다고 보고되었다^[3]. MESFET은 광감도면에 있어서 고속 광검출, 광제어 증폭, 광제어 발진, 광-초고주파 변환등과 같은 다양한 광전자 응용의 가능성을 갖고 있어 고속 모노리틱 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuits) 와 OEIC(Opto-Electronic Integrated Circuits)안에 탑재되어 광통신 시스템에 널리 응용되고 있다. 고속 저 전력 광검출기로서의 GaAs MESFET의 가능성은 Baack등에 의해 실험적으로 입증되었으며^[4], Gammel등에 의해 광제어 MESFET을 OPFET (Optical Field Effect Transistor)라고 명명되었다^[5]. Graffeuil 등은 광선의 입사시 GaAs FET내에서 DC 및 동적 특성의 변화가 게이트 접합내의 적당한 변화에 의해 등가 내부전압의 원인이 될 수 있음을 이론적·실험적으로 보였다^[6]. 이후, 소자내의 여러 가지 동작 메커니즘에 대한 더 깊은 이해 및 이 소자의 응용가능성을 찾기 위해, MESFET의 DC와 초고주파 특성에 대한 광조사 효과에 대한 지난 이십 여년에 걸친 주된 연구를 대별하면, Graffeuil등^[6]과 Sugeta등^[7]에 의한 GaAs MESFET의 광응답에 대한 연구, De Salles^{[8],[9]}에 의한 GaAs MESFET의 광제어에 대한 연구, Mizuno^[10]에 의한 GaAs MESFET의 초고주파 특성, Chaturvedi등^[11]에 의한 GaAs MESFET에 대한 광조사 효과, Simons^[12], Simons, Bashin^[13]등에 의한 DC와 초고주파 양쪽에서의 MESFET의 광 응답에 대한 광범위한 측정, 그리고 Darling등^[14]에 의한 He-Ne광원 조사 하에서의 GaAs MESFET의 대신호 특성 등이다. 광감지소자의 감도는 소자의 광 흡수계수에 크게 의존하는데, MESFET에 광조사하는 전통적인 방법은 투명·반투명 게이트 또는 불투명게이트를 사용한 앞단 광조사이다^[15]. MESFET안으로의 광 흡수를 증가시키기 위하여 Salles는 광섬유가 소자의 기관내부로 부분적 또는 완전히 삽입되는 소자의 뒷단으로부터 광이 조사되는 것과, 앞단 광조사를 갖는 게이트 매물형 MESFET을 제안하였다^[16]. 최근, Roy등은 뒷단 광조사의 불투명 게이트를 갖는 GaAs MESFET에 관해 연구를 통하여 광섬유가 활성층 기관 접합의 경계까지 충분히 끼워진 뒷단 광조사를 갖는 소자에서 전류가 최대임이 관찰되었다^[17]. 광조사 조건하에서 이온-주입 Si MESFET의 DC 특성을 결

정하기 위한 폐쇄형 해석 모델이 Singh 등에 의해 개발되었고^[18], 뒤이어 Mishra 등에 의해 광제어 GaAs MESFET으로 확장되었다^[19]. 이 모델들에서는 광전압 효과는 무시하고 단지 광도전 효과만이 고려되었다^[20]. 그 뒤에 준 수치적 접근에 기초한 좀 더 실제적인 모델이 Chakrabarti등에 의해 광제어 이온-주입 Si 및 GaAs MESFET에 대해 개발되었다^{[21],[22]}. 또한, Mohammed 등은 광조사하에서 장·단채널 GaAs MESFET의 I-V특성을 결정하는 이론적인 모델을 개발하였다^[23]. GaAs MESFET에서의 광생성 전류에 대한 모델이 Madjar등에 의해 제안되었으며^[24], 광제어 GaAs MESFET의 스위칭 특성이 Chakrabarti 등^{[25],[26]}과 Madjar 등^[27]에 의해 모델링되었다. 게이트 매물형 소자는 전력소자로서 관심을 끌어 왔으며, 매물 게이트에 대한 접촉은, 상층 표면으로부터 접촉 영역을 확산시키거나 게이트까지 아래로 에칭 하거나 하여 만들어진다. 이와 같은 게이트 매물형 소자들은 수광효율의 극대화를 기해, 속도, 전력, 안정도 등의 면에서 우수한 성능을 나타낸다.

2. 본 연구의 개요

본 논문은 게이트 매물형 구조의 GaAs MESFET 소자에 대한 해석적 모델에 관해 연구하였다. 제반 성능의 향상을 기한 광소자로 연구 개발하기 위해서는 먼저 MESFET소자의 근본적 동작 원리를 비롯한 물리적 해석에 관한 정확한 이해로부터 출발하여야 하며 이에 대한 여러 연구가 제시된 바 있다^{[28],[29],[30]}. 이로써, 신속한 모의 실험이 가능하여 CAD (Computer Aided Design)에의 응용에 적합하고 소자의 물리적 현상들을 정확하고도 간편하게 반영할 수 있는 해석적 모델의 개발을 도모하였다. 반도체 표면에 수직으로 조사된 광이 반도체 내부로 흡수되면 다음 두 가지 현상이 일어날 것이 예상된다. i) 전도 채널 내에 전자와 정공 밀도의 증가, 즉, photo conductivity 현상의 발생, ii) 공핍층 내의 전자-정공 쌍의 생성이 공핍층 폭의 축소를 일으키고, 이 현상은 공핍층 양단에 광기전력을 유기시키는 현상, 즉, photo-voltaic effect의 발생. 상기 두 현상이 채널-게이트간을 개방시킴으로 드레인 전류의 증가로 나타날 것이므로, 본 연구는 광조사에 의한 단채널 MESFET 소자의 드레인 전류의 특성 변화를 해석적으로 modeling하고자 다음의 가정을 도입하기로 하자. i) MESFET의 전류 특성 도출을 위한 해석적 model이 공핍근사(depletion approximation)를 적용하므로 본 모델도 공핍근사를 도입하여 채널을 공간 전

하밀도가 거의 0 인 유효(전도) 채널과 전하밀도가 큰 공핍영역으로 나누어 고찰한다. ii)광조사로 인한 준중성 영역(quasi-neutral region)의 다수 및 소수 캐리어 밀도 변화는 정상상태의 캐리어 연속 방정식으로부터 도출한다. iii) 입사된 광은 채널 내에서 일정한 감쇠정수 α 로 흡수되어 광 flux는 위치 x 에 대해 지수적으로 감소된다. 또, 흡수된 광자는 전자-정공 쌍을 생성한다. iv) 공핍층 내에서는 공핍층의 폭을 줄이는 광기전력이 발생하고 이 광기전력은 게이트-채널간의 열전자 방출전류를 증가시키고, 이 열전자 방출전류가 x 방향의 광전류를 상쇄시킨다. v)광기전력에 의해 공핍층폭의 축소가 드레인 전류의 증가를 일으킨다. vi)전도 채널내의 다수 캐리어 증가는 ambipolar diffusion의 개념을 도입, 소수 캐리어의 밀도 증가량과 같다고 본다. vii) 전도 채널내의 다수 캐리어 증가가 드레인 전류의 증가를 일으킨다. viii) 단채널 MESFET의 채널 내에서 2-차원 Poisson 방정식을 풀어 공핍층 폭의 y 의존성을 도출한다. ix)캐리어의 연속방정식 및 채널 내 2-차원 Poisson 방정식의 풀이를 위한 경계조건들을 적절히 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문의 해석 모델인 광 검출용 단채널 buried-gate MESFET에 광이 인가되었을 때의 2차원 해석적 모델링 과정을 통해 단채널 GaAs MESFET소자의 암전류 특성과 광조사 특성을 해석적으로 modeling하고 이를 simulation하여 그 결과를 분석, 검토하여 4장에서 본 연구의 최종 결과를 요약 정리하였다.

II. 모 형 화

1. 캐리어 연속방정식

본 논문의 모형화에 사용된 게이트 매물형 광검과용 MESFET소자의 단면도를 그림 1에 나타내었다. 입사 광은 무반사(anti-reflective) 코팅 처리된 MESFET의 채널 정면으로 조사되고 있다. 그림에서 x 는 반도체 표면에서 기판쪽으로의 방향, y 는 소오스에서 드레인 쪽으로의 방향을 나타내는 좌표이며, 채널의 도핑농도는 N_D 이다. L 은 채널길이, b 는 채널의 폭이며, T_G 는 준-절연 기판 위에 매물된 게이트의 두께이다. 채널위치 y 에서의 공핍영역의 폭은 $h(y)$ 로 표현했다.

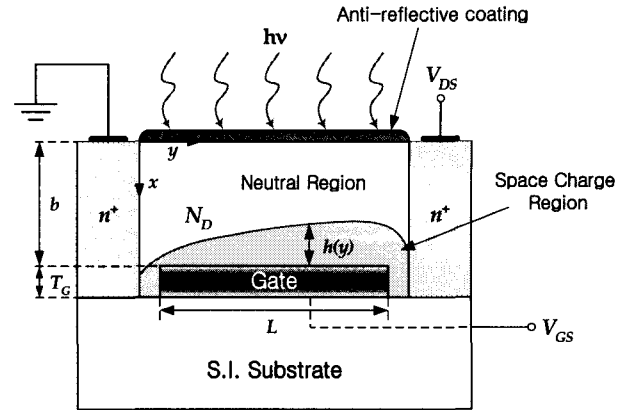


그림 1. 본 모형화의 게이트 매물형 MESFET 단면도
Fig. 1. Cross-section of a buried-gate MESFET to be modeled.

광조사시에 대한 MESFET의 정상상태 동작특성을 해석하기 위해, 우선 전자의 밀도 $n(x, y)$ 과 정공의 밀도 $p(x, y)$ 에 대한 다음의 정상상태에 대한 연속 방정식을 고려하자.

$$G_n - R_n + \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n = 0 \quad (1a)$$

$$G_p - R_p - \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p = 0 \quad (1b)$$

단, q 는 전자 전하량의 절대값을, G_n 과 G_p , R_n 과 R_p 는 각각 단위체적 당 전자와 정공의 생성율과 재결합율을 나타낸다. 광조사시, $G_n - R_n$ 및 $G_p - R_p$ 는 다음 관계가 성립한다.

$$G_n - R_n = g_{op}(x) - U_n(x, y) \quad (2a)$$

$$G_p - R_p = g_{op}(x) - U_p(x, y) \quad (2b)$$

단, $g_{op}(x)$ 는 채널위치에 흡수된 광자에 의한 전자-정공 쌍(EHP)의 생성율이다. 반도체 표면에 Φ_0 의 광 flux로 광이 조사되어 GaAs의 단위길이 당 광흡수계수가 α 로 일정하게 광이 흡수되고 반도체에 흡수된 광자 당 한 쌍의 전자-정공 쌍(EHP)을 생성한다고 가정하면, 광조사에 의한 캐리어의 생성율 $g_{op}(x)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$g_{op}(x) = -\frac{d\Phi}{dx} = \alpha \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

단, U_n 과 U_p 는 전자 및 정공의 알짜 재결합율이다. 전자 trap 및 정공 trap에 의한 과잉 캐리어들의 생성-소멸과정이 무시될 경우 $U_n = U_p$ 이다. U_n 과 U_p 는 직

접재결합에 의한 경우,

$$U_n = U_p = r(np - n_i^2) \quad (4)$$

이다. 단, r 은 직접재결합과정에 대한 상수이며 n_i 는 진성 반도체의 열평형시의 캐리어밀도이다. 간접재결합에 의한 경우, low level injection의 조건이 만족되는 공간에서, U_n 과 U_p 는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$U_n \doteq \frac{n'(x, y)}{\tau_n} \quad (p\text{형 반도체}), \quad (5a)$$

$$U_p \doteq \frac{p'(x, y)}{\tau_p} \quad (n\text{형 반도체}), \quad (5b)$$

단, $n'(x, y) = n(x, y) - n_o$, $p'(x, y) = p(x, y) - p_o$, n_o 및 p_o 는 열평형시 전자 및 정공밀도이고, τ_n 과 τ_p 는 과잉전자와 과잉정공의 평균수명이다. n형 반도체 이면서도, 전자밀도가 열평형시의 전자밀도 n_o 값 보다 매우 작은 공핍영역에서는 $n < n_i$ 및 $p < n_i$ 이 성립하며 재결합중심준위가 midband 근방인 경우, 식(5a)와(5b)는 다음과 같이 근사화된다.

$$U_n = U_p \doteq -\frac{n_i}{\tau_p + \tau_n} = -\frac{n_i}{\tau_o} \quad (6)$$

반도체 표면이 얇은 산화막으로 피복되어 있거나 절연체로 coating처리된 경우, surface state 및 surface trap이 존재하며, 이들의 에너지 준위는 bulk 내의 재결합중심과는 달리 금지대내의 전 영역에 걸쳐 분포하고 있다. 따라서, 반도체 표면에서는 전자-정공 쌍의 재결합 외에도 전자 trap 및 정공 trap 이 수반될 수 있다. 이 경우, 반도체 표면 단위 면적 당 전자 및 정공의 소멸율 R_n 및 R_p 는 일반적으로 매우 복잡하나, 보통 다음과 같이 표현된다.

$$R_n \doteq s_n n_s', \quad R_p \doteq s_p p_s' \quad (7)$$

여기서 s_n 와 s_p 는 반도체표면의 과잉전자 및 과잉정공에 대한 재결합속도이며, n_s' 및 p_s' 는 표면에서의 과잉전자밀도와 과잉정공 밀도를 나타낸다.

전자와 정공의 전류밀도 \vec{J}_n 과 \vec{J}_p 는, 각각 표동성분과 확산성분의 합으로 표시된다. 즉,

$$\vec{J}_n(x, y) = -q\mu_n n \nabla \Psi + qD_n \nabla n \quad (8a)$$

$$\vec{J}_p(x, y) = -q\mu_p p \nabla \Psi - qD_p \nabla p \quad (8b)$$

여기서 μ_n 과 μ_p 는 전자와 정공의 이동도, D_n 과 D_p

는 전자와 정공의 확산정수, $\Psi(x, y)$ 는 위치 (x, y) 의 전위이다. μ_n 과 μ_p 이 위치에 무관한 경우, \vec{J}_n 과 \vec{J}_p 의 발산량은

$$\nabla \cdot \vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla^2 \Psi - q\mu_n \nabla n \cdot \nabla \Psi + qD_n \nabla^2 n \quad (9a)$$

$$\nabla \cdot \vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla^2 \Psi - q\mu_p \nabla p \cdot \nabla \Psi - qD_p \nabla^2 p \quad (9b)$$

로 표시된다. 식(9a) 및 (9b)의 $\nabla^2 \Psi$ 는 Poisson 방정식으로부터 다음과 같이 대입할 수 있다.

$$\nabla^2 \Psi(x, y) = -\frac{\rho(x, y)}{\epsilon_s} \quad (10)$$

단, $\rho(x, y)$ 는 공간 전하밀도이고 ϵ_s 는 반도체의 유전율이다. 한편,

$$\left| \frac{\partial n}{\partial x} \right| \gg \left| \frac{\partial n}{\partial y} \right|, \quad \left| \frac{\partial p}{\partial x} \right| \gg \left| \frac{\partial p}{\partial y} \right|, \quad (11)$$

가 성립한다고 가정하면, 식(1a) 및 (1b)는 각각 다음과 같이 표시된다..

$$\alpha \Phi_0 e^{-\alpha x} - U_n + \frac{\mu_n}{\epsilon_s} \rho n + \mu_n E_x \frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = 0 \quad (12a)$$

$$\alpha \Phi_0 e^{-\alpha x} - U_p - \frac{\mu_p}{\epsilon_s} \rho p - \mu_p E_x \frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (12b)$$

단, $E_x(x, y) = -\partial \Psi / \partial x$ 는 x 방향의 전계이다.

2. 중성영역에서의 캐리어밀도 도출

중성영역($0 \leq x \leq b - h(y)$)에서는 다음의 근사식이 성립할 것이다.

$$\rho(x, y) \doteq 0 \quad (13)$$

$$E_x(x, y) \doteq 0 \quad (14)$$

따라서 소수 캐리어에 대한 연속방정식인 식(12b)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D_p \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} - \frac{p'(x, y)}{\tau_p} \doteq -\alpha \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (15)$$

반도체 표면과 공핍층 경계면에서 다음의 경계조건이 성립할 것이다.

$$J_{px}(0, y) = -qD_p \frac{\partial p'}{\partial x} \Big|_{x=0} = -q s_p p'(0, y) \quad (16)$$

$$p'(b-h, y) \approx 0 \quad (17)$$

단, s_p 는 표면의 재결합 속도이다. 그러면 중성영역에서의 과잉 정공밀도는 아래 식으로 표시된다.

$$p'(x, y) = A(y) e^{x/L_p} + B(y) e^{-x/L_p} + \frac{\alpha \tau_p \Phi_0}{1 - \alpha^2 L_p^2} e^{-\alpha x} \quad (18)$$

단, $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ 이며, $A(y)$ 와 $B(y)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$A(y) = \frac{e^{-\alpha [b-h(y)]/L_p} - D_2 e^{-[b-h(y)]/L_p}}{e^{[b-h(y)]/L_p} + D_1 e^{-[b-h(y)]/L_p}} \Pi_0 \quad (19)$$

$$B(y) = \frac{D_2 e^{[b-h(y)]/L_p} + D_1 e^{-\alpha [b-h(y)]}}{e^{[b-h(y)]/L_p} + D_1 e^{-[b-h(y)]/L_p}} \Pi_0 \quad (20)$$

단,

$$D_1 = \frac{D_p - s_p L_p}{D_p + s_p L_p} \quad (21)$$

$$D_2 = \frac{\alpha L_p D_p + s_p L_p}{D_p + s_p L_p} \quad (22)$$

$$\Pi_0 = \frac{\alpha \tau_p \Phi_0}{\alpha^2 L_p^2 - 1} \quad (23)$$

수식의 단순화를 위해

$$e^{[b-h(y)]/L_p} \gg D_1 e^{-[b-h(y)]/L_p} \quad (24)$$

을 가정하면, 식(19) 및 (20)은 다음과 같이 근사적으로 쓸 수 있다.

$$A(y) \approx \{e^{-\alpha [b-h(y)]} - D_2 e^{-2[b-h(y)]/L_p}\} \Pi_0 \quad (25)$$

$$B(y) \approx \{D_2 + D_1 e^{-\alpha [b-h(y)]}\} \Pi_0 \quad (26)$$

단, $\alpha' = \alpha + 1/L_p$ 이다. 따라서, 공핍층 경계면에서의 정공 전류밀도는 다음과 같이 도출된다.

$$J_{px}(b-h, y) \approx \frac{q D_p}{L_p} \{D_1 e^{-\alpha [b-h(y)] - 2[b-h(y)]/L_p} + 2D_2 e^{-[b-h(y)]/L_p} - (1 + \alpha L_p) e^{-\alpha [b-h(y)]}\} \quad (27)$$

한편, 중성영역, 엄밀히는 준 중성영역(quasi-neutral region)에서, 다수 캐리어인 전자의 밀도는 매우 크므로, 식(12a)에서 ρn 항을 무시할 수 없다. 뿐만 아니라, 전자의 소멸을 U_n 도 간단한 식으로 표시하기가 힘들다. 이 결과, 식(12a)는 해석적 풀이가 가능하도록

적절히 근사화 할 수 없다. 이 문제를 해결하기 위해 여러 연구자들에 의해 다양한 model이 제안되어 왔다. 본 연구에서는 보다 타당성을 갖도록 ambipolar diffusion 개념을 도입하여 식(12a)의 풀이 없이 근사적으로 다음 관계식을 얻게 된다.

$$n'(x, y) \approx p'(x, y) \quad (28)$$

3. 공핍영역에서의 드리프트 전류

공핍영역 ($b-h(y) \leq x \leq b$)에서는 다음의 근사식이 성립할 것이다.

$$\rho(x, y) \approx q N_D \quad (29)$$

광흡수가 없을 때의 캐리어밀도는 열평형 시의 값이 아닌 x 의 함수이나 공핍근사의 도입으로 공핍층 내의 전자 및 정공밀도를 0으로 심하게 단순화하였다. 이 때문에 식(12a) 및 식(12b)는 해석적 풀이가 거의 불가능하다고 볼 수 있다. 한편, 공핍층 내의 강한 전계로 인하여 광조사에 의해 생성된 전자-정공 쌍은 매우 빨리 공핍층을 빠져나갈 것이다. 즉, 생성된 전자는 중성영역 쪽으로 생성된 정공은 게이트 전극 쪽으로 드리프트될 것이다. 공핍층 내에서 전자-정공 쌍의 avalanche multiplication을 무시할 경우, 전자와 정공에 의한 표동전류 $J_{dr,x}(y)$ 는 다음과 같이 근사적으로 표시된다.

$$J_{dr,x}(y) \approx q \int_{b-h(y)}^b g_{op}(x) dx = q \Phi_0 [e^{-\alpha b + \alpha h(y)} - e^{-\alpha b}] \quad (30)$$

따라서, $x = b$ 에서 광에 의한 정공전류밀도 $J_{px}(b, y)$ 는 $x = b-h(y)$ 에서의 정공확산전류 $J_{px}(b-h, y)$ 와 $J_{dr,x}(y)$ 의 합으로 표현될 것이다.

$$J_{px}(b, y) = J_{px}(b-h, y) + J_{dr,x}(y) \quad (31)$$

이 전류밀도는 게이트-채널간이 bias 전원으로 연결된 경우 Schottky 접합 diode의 x 방향의 광전류밀도에 해당되며 x 에 무관한 값이 된다.

4. 광 기전력

본 연구에서 고찰하는 MESFET소자는 그 구조가 p-n 접합 diode 또는 Schottky 접합 diode와 달리 채널 끝단 ($x=0$)이 개방되어 있다. 따라서 x -방향의 전류는 0이어야 한다. 이 조건이 성립하기 위해서는 Schottky 접합에서 x 방향의 광전류를 상쇄하도록 열

전자 방출이 증가되는 광기전효과(photo-voltaic effect)가 일어나야 한다. 즉, 게이트-채널간에 전자방출전류를 순방 bias 방향 (열전자의 방출은 반도체에서 게이트 금속 방향으로 일어나므로 열전자 방출전류의 방향은 $-x$ 방향)으로 흐르게 하는 광기전전압(photo-generated voltage)이 유기될 것이다. 광기전전압 V_{op} 는 식(32)로 표현된 x 방향의 광전류밀도가 y 의 함수이므로(공핍층 폭이 y 의 함수임) y 의 함수인 $V_{op}(y)$ 가 될 것이다. 광기전력 $V_{op}(y)$ 에 의한 Schottky 접합의 열전자 방출전류밀도 $J_{th,x}(y)$ 를 다음과 같이 표현하자.

$$J_{th,x}(y)|_{dark} = -J_S [e^{\beta V_{op}(y)} - 1] \quad (32)$$

단, β 는 열전압의 역수, 즉 $\beta = \mu_p / D_p = q / (kT)$ 이고, J_S 는 Schottky 접합의 역방 포화전류밀도이다. J_S 앞의 $-$ 부호는 Schottky 접합의 열전자 방출전류의 순방전류가 $-x$ 방향으로 흐름을 고려한 것이다. 그러면,

$$J_{px}(b, y) + J_{th,x}(y) = 0 \quad (33)$$

의 관계로부터 $V_{op}(y)$ 를 다음과 같이 도출될 것이다.

$$V_{op}(y) = \frac{1}{\beta} \ln \left[1 + \frac{J_{px}(b-h, y) + J_{dr,x}(y)}{J_S} \right] \quad (34)$$

5. 광 및 2차원 효과를 고려한 공핍층 폭

$h(y)$ 및 E_x 를 도출하기 위해서 공핍근사(depletion-approximation)를 적용한 다음의 2차원 Poisson 방정식의 해법으로부터 출발할 수 있다.

$$\nabla^2 \Psi(x, y) = \begin{cases} -\frac{qN_D}{\epsilon_s}, & b-h(y) \leq x \leq b, \\ 0, & 0 \leq x \leq b-h(y), \end{cases} \quad (35)$$

여기서 $\Psi(x, y)$ 는 좌표 (x, y) 에서의 전위분포, ϵ_s 는 채널의 유전율, N_D 는 채널에서 균일하다고 가정한 도너 도핑 레벨을 나타내며, $h(y)$ 는 위치 y 에서의 수직 공핍층 폭이다. 식(35)에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\Psi(b, y) = V_{GS} - V_{bi} = V_{GS}' \quad (36)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (37)$$

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=b-h(y)^-} = \left. \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right|_{x=b-h(y)^+}, \quad (38)$$

$$\Psi(b-h(y)^-, y) = \Psi(b-h(y)^+, y), \quad (39)$$

$$\Psi(0, y) = V(y) - V_{op}(y) + V_{GS}', \quad (40)$$

단, V_{bi} 는 게이트-채널 접합의 built-in 전압이며, $V(y)$ 는 광조사가 없을 때의 $\Psi(0, y) - V_{GS}'$ 이다. 식(35)의 2차원적 해를 근사적으로 도출하기 위해 먼저 GCA (Gradual Channel Approximation)을 적용하여 $\Psi(x, y)$ 와 $h(y)$ 는 다음과 같다.

$$\Psi(x, y) = \begin{cases} V_{GS}' - \frac{qN_D}{2\epsilon_s}(x-b)^2 - \frac{qN_D h(y)}{\epsilon_s}(x-b), & b-h(y) \leq x \leq b, \\ V'(y) + V_{GS}', & 0 \leq x \leq b-h(y), \end{cases} \quad (41)$$

$$h(y) = \frac{b}{\sqrt{V_p}} \sqrt{V'(y)}, \quad (42)$$

단, $V'(y) = V(y) - V_{op}(y)$ 이다. 그러나 단채널 소자에서 어느 정도의 크기의 드레인 전압이 인가되면 식(41) 및 (42)의 $\Psi(x, y)$ 와 $h(y)$ 의 표현식은 정확성이 저하된다. 단채널 소자에 적용할 수 있는 $\Psi(x, y)$ 를 구하고자 다음을 고려하자.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = \begin{cases} \frac{d^2 V'}{dy^2}, & x=0, \\ 0, & x=b. \end{cases} \quad (43)$$

식(43)으로부터 다음의 가정을 할 수 있을 것이다.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = \frac{b-x}{b} \frac{d^2 V'}{dy^2}, \quad 0 \leq x \leq b. \quad (44)$$

이를 GCA 대신 식(42)에 대입하면 $\Psi(x, y)$ 는 공핍영역에서

$$\Psi(x, y) = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s}(x-b)^2 - \frac{qN_D}{\epsilon_s}(x-b)h(y) + V_{GS}' + \left(\frac{x^3}{6b} - \frac{x^2}{2} + \frac{b^2}{3} \right) \frac{d^2 V}{dy^2} \quad (45)$$

이고, 중성영역에서

$$\Psi(x, y) = V'(y) + V_{GS}' + \frac{d^2 V}{dy^2} \left(\frac{x^3}{6b} - \frac{x^2}{2} \right) \quad (46)$$

으로 도출된다. 식(45)와 식(46)의 값이 $x = b-h(y)$ 에서 일치해야하는 조건으로부터 공핍층 폭 $h(y)$ 는 다음과 같이 도출된다.

$$h(y) = \frac{b}{\sqrt{V_p}} \sqrt{V'(y) - \frac{b^2}{3} \frac{d^2 V'}{dy^2}} \quad (47)$$

$h(y)$ 를 $V'(y)$ 의 함수로 표현하기 위해 다음의 가정을 하기로 하자.

$$\frac{b^2}{3} \frac{d^2 V'}{dy^2} = \xi(y) \cong \xi_0 + \xi_0' [V'(y) - V_0], \quad (48)$$

단, $V_0' = V'(0)$, $\xi_0 = \xi(0)$, $\xi_0' = d\xi/dV'|_{y=0}$ 이다. 그러면 식(48)은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$h(y) \cong \frac{b}{\sqrt{V_p}} \sqrt{V^*(y)} \quad (49)$$

단,

$$V^*(y) = (1 - \zeta) V'(y) + \eta. \quad (50)$$

$$\zeta = \xi_0', \quad (51)$$

$$\eta = \xi_0' V_0' - \xi_0. \quad (52)$$

중성영역에서 y 방향의 전계는 식(46)을 y 에 대해 미분하여

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} \cong \frac{dV'}{dy} - \frac{b^2}{3} \left(\frac{3x^2}{2b^2} - \frac{x^3}{2b^3} \right) \frac{d^3 V'}{dy^3} \quad (53)$$

을 얻게 된다. 식(48)을 y 에 대해 미분하면,

$$\frac{b^2}{3} \frac{d^3 V'}{dy^3} \cong \zeta \frac{dV'}{dy} \quad (54)$$

이므로, 식(53)는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial y} \cong \left(1 - \frac{3\zeta x^2}{2b^2} + \frac{\zeta x^3}{2b^3} \right) \frac{dV'}{dy} \quad (55)$$

6. 단채널 소자의 드레인전류

광에 의한 효과가 없을 때 채널위치 y 에서의 드레인전류 $I_D(y)$ 는 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_D(y) &\cong ZqN_D \mu_n(y) \int_0^{b-h} \frac{\partial \Psi}{\partial y} dx \\ &= ZbqN_D \mu_n(y) \frac{dV}{dy} \{ 1 - \sqrt{v(y)} \\ &\quad - \frac{\zeta}{2} [1 - \sqrt{v(y)}]^3 + \frac{\zeta}{8} [1 - \sqrt{v(y)}]^4 \} \end{aligned} \quad (56)$$

단, $\mu_n(y)$ 은 위치 y 의 전자 이동도이고, $v(y)$ 는 다음과 같이 정의되었다.

$$v(y) = \frac{h^2(y)}{b^2} = \frac{V^*(y)}{V_p} \quad (57)$$

수식의 단순화를 위해,

$$[1 - \sqrt{v(y)}]^3 \cong 1 - 3\sqrt{v(y)}, \quad (58a)$$

$$[1 - \sqrt{v(y)}]^4 \cong 1 - 4\sqrt{v(y)}, \quad (58b)$$

를 가정하고,

$$\frac{dV}{dy} = \frac{1}{1 - \zeta} \frac{dV^*}{dy} = \frac{V_p}{1 - \zeta} \frac{dv}{dy} \quad (59)$$

을 이용하면, 식(56)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I_D(y) &\cong ZbqN_D \mu_n(y) \frac{dV}{dy} \\ &\quad \times \left[\frac{V_p}{1 - \zeta} \left(1 - \frac{3\zeta}{8} \right) - V_p \sqrt{v(y)} \right] \end{aligned} \quad (60)$$

식(60)의 양변을 $\mu_n(y)$ 으로 나누고 드레인 전류의 연속성을 고려하여 y 에 따라 $y=0$ 부터 $y=L$ 까지 적분하면 드레인 전류를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{ZbqN_D \bar{\mu}_n}{L} \left[\left(1 - \frac{3\zeta}{8} \right) (V_L - V_0) \right. \\ &\quad \left. - \frac{2}{3\sqrt{V_p}} (V_L^{3/2} - V_0^{3/2}) \right] \end{aligned} \quad (61)$$

단, $V_0 = V(0)$, $V_L = V(L)$, $V_0^* = V^*(0)$,

$V_L^* = V^*(L)$ 이고, $\bar{\mu}_n$ 는 전자의 유효 이동도로서 다음과 같이 정의되는 값이다.

$$\bar{\mu}_n = \frac{L}{\int_0^L \frac{dy}{\mu_n(y)}}. \quad (62)$$

ξ_0 , ξ_0' 와 $\bar{\mu}_n$ 의 값을 정하기 위해서 다음의 표현식을 쓰기로 하자.

$$\mu_n(y) \cong \frac{\mu_o}{\left\{ 1 + \left[\frac{\mu_o}{v_{sat}} F(y) \right]^\alpha \right\}^{1/\alpha}}, \quad (63)$$

여기서 μ_o 와 v_{sat} 는 각각 채널에서 전자의 저전계 이동도와 포화속도를 말하며, α 의 값은 1과 2사이의 값이다. 또한 $F(y) = dV/dy$ 이다. 수식을 간단히 하기 위해서 $\alpha \cong 1$ 로 하고 식(63)을 식(62)에 대입하면 다음의 표현식을 얻게된다.

$$\bar{\mu}_n \cong \frac{\mu_o}{1 + \frac{\mu_o}{L v_{sat}} (V_L - V_0)}. \quad (64)$$

식(64)을 식(60)에 대입하면,

$$F(y) = \frac{F_C i_D}{1 - \frac{3\xi}{8} - (1-\xi)\sqrt{v(y)} - i_D}, \quad (65)$$

이때 $F_C = v_{sat}/\mu_o$, $i_D = I_D/(ZbqN_D v_{sat})$ 이다.
식 (65)와,

$$\begin{aligned} \xi(y) &= \frac{b^2}{3} \frac{d^2 V}{dy^2} \\ &= \frac{b^2}{6} \frac{dF^2}{dV} = \frac{b^2}{6} \frac{1-\xi}{V_p} \frac{dF^2}{dv} \end{aligned} \quad (66)$$

식(69)을 고려하면,

$$\xi(y) = \frac{b^2 F_C^2 i_D^2 (1-\xi)^2}{6 V_p \sqrt{v(y)} \left[1 - \frac{3\xi}{8} - (1-\xi)\sqrt{v(y)} - i_D \right]^3}, \quad (67)$$

따라서,

$$\xi_o' \doteq \frac{\xi_L - \xi_o}{V_L^* - V_o^*}, \quad (68)$$

이상의 결과 관련 수식들을 결합하여 반복법(iteration method)을 이용하면 ξ_o 및 ξ_L 을 구할 수 있다.

7. 중성 영역의 광 전류

채널위치 y 에서 드레인전류 $I_D(y)$ 는 다음과 같이 고려할 수 있다.

$$I_D(y) = I_{D,1}(y) + \Delta I_D(y) \quad (69)$$

이때 $I_{D,1}(y)$ 는 식(60)에서 나타낸 값이며 $\Delta I_D(y)$ 는 다음과 같다.

$$\Delta I_D(y) = Zq\mu_n(y) \int_0^{b-h} n'(x, y) \frac{\partial \Psi}{\partial y} dx \quad (70)$$

문제를 단순화하기 위해 $\partial \Psi / \partial y \doteq dV'/dy$ 로 가정하고, 식(20) 및 식(30)을 대입하면 $\Delta I_D(y)$ 는 아래와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \Delta I_D(y) &= Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \\ &\times \int_0^{b-h} [Ae^{x/L_p} + Be^{-x/L_p} - \Pi_0 e^{-\alpha x}] dx \end{aligned} \quad (71)$$

식(71)를 x 에 대해 적분하면 다음 식을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta I_D(y) &= \Delta I_{D,1}(y) + \Delta I_{D,2}(y) + \Delta I_{D,3}(y) \\ &+ \Delta I_{D,4}(y) + \Delta I_{D,5}(y) + \Delta I_{D,6}(y) \end{aligned} \quad (72)$$

여기서,

$$\Delta I_{D,1}(y) = Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \left(L_p D_2 - \frac{1}{\alpha} \right) \Pi_0 \quad (73)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,2}(y) &= Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \\ &\times \left[-2L_p D_2 \Pi_0 e^{-(b-h)/L_p} \right] \end{aligned} \quad (74)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,3}(y) &= Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \\ &\times \left[L_p D_2 \Pi_0 e^{-2(b-h)/L_p} \right] \end{aligned} \quad (75)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,4}(y) &= Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \\ &\times \left[\left(L_p \Pi_0 + \frac{\Pi_0}{\alpha} \right) e^{-\alpha(b-h)} \right] \end{aligned} \quad (76)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,5}(y) &= Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \\ &\times \left[(L_p D_1 \Pi_0 - L_p \Pi_0) e^{-\alpha'(b-h)} \right] \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,6}(y) &= Zq\mu_n(y) \frac{dV'}{dy} \\ &\times \left[(-L_p D_1 \Pi_0) e^{-\alpha'(b-h)} \right] \end{aligned} \quad (78)$$

단,

$$\alpha' = \alpha + 2/L_p \quad (79)$$

식(72)의 양변을 $\mu_n(y)$ 으로 나누고 y 에 따라 $y=0$ 부터 $y=L$ 까지 적분하면 ΔI_D 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta I_D &= \Delta I_{D,1} + \Delta I_{D,2} + \Delta I_{D,3} \\ &+ \Delta I_{D,4} + \Delta I_{D,5} + \Delta I_{D,6} \end{aligned} \quad (80)$$

단,

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,1} &= \frac{ZqV_p \bar{\mu}_n}{b^2 L (1 - \xi_o')} \\ &\times \left(L_p D_2 \Pi_0 - \frac{\Pi_0}{\alpha} \right) (h_L^2 - h_0^2) \end{aligned} \quad (81)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,2} &= -\frac{2ZqV_p \bar{\mu}_n}{b^2 L (1 - \xi_o')} (2L_p^2 D_2 \Pi_0) \\ &\times \left[e^{-(b-h_L)/L_p} (h_L - L_p) - e^{-(b-h_0)/L_p} (h_0 - L_p) \right] \end{aligned} \quad (82)$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{D,3} &= \frac{ZqV_p \bar{\mu}_n}{b^2 L (1 - \xi_o')} (L_p^2 D_2 \Pi_0) \\ &\times \left[e^{-2(b-h_L)/L_p} \left(h_L - \frac{L_p}{2} \right) \right. \\ &\quad \left. - e^{-2(b-h_0)/L_p} \left(h_0 - \frac{L_p}{2} \right) \right] \end{aligned} \quad (83)$$

$$\Delta I_{D,4} = \frac{2ZqV_p\bar{\mu}_n}{b^2L(1-\xi_o')} \frac{L_p\Pi_0 + \frac{1}{\alpha}\Pi_0}{a} \times \left[e^{-\alpha(b-h_L)}\left(h_L - \frac{1}{\alpha}\right) - e^{-\alpha(b-h_0)}\left(h_0 - \frac{1}{\alpha}\right) \right] \quad (84)$$

$$\Delta I_{D,5} = \frac{2ZqV_p\bar{\mu}_n}{b^2L(1-\xi_o')} \frac{L_pD_1\Pi_0 - L_p\Pi_0}{a'} \times \left[e^{-\alpha'(b-h_L)}\left(h_L - \frac{1}{\alpha'}\right) - e^{-\alpha'(b-h_0)}\left(h_0 - \frac{1}{\alpha'}\right) \right] \quad (85)$$

$$\Delta I_{D,6} = -\frac{2ZqV_p\bar{\mu}_n}{b^2L(1-\xi_o')} \frac{L_pD_1\Pi_0}{a''} \times \left[e^{-\alpha''(b-h_L)}\left(h_L - \frac{1}{\alpha''}\right) - e^{-\alpha''(b-h_0)}\left(h_0 - \frac{1}{\alpha''}\right) \right] \quad (86)$$

III. 시뮬레이션 및 검토

1. 계산 흐름도

그림 2는 본 모델의 계산의 흐름도이다. 먼저 채널의 폭과 길이, 도핑농도와 같은 device 파라미터들과, 게이트전압, 드레인전압의 바이어스 조건들을 정하고, $\Phi_0, \tau_p, s_p, \alpha$ 등의 광조사와 관련된 파라미터들의 값

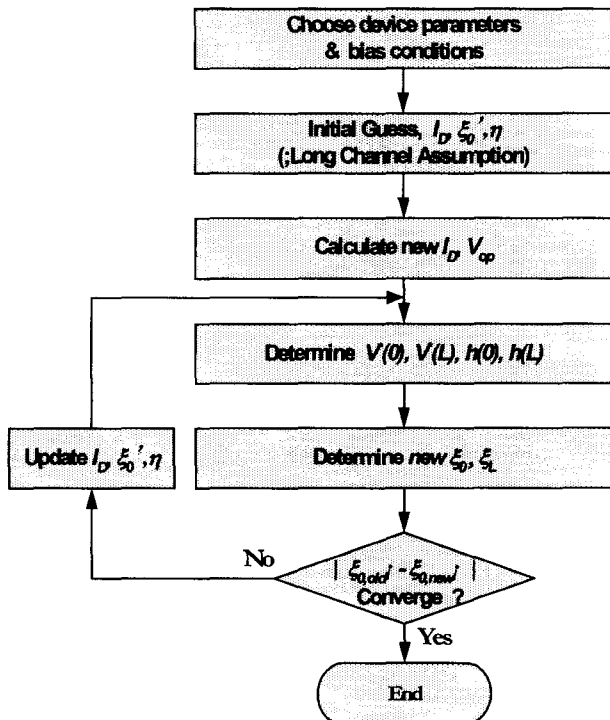


그림 2. 본 모델의 계산 흐름도.
Fig. 2. Calculation flowchart for this model.

을 선택했다. 한편 I_D 의 값은 다시 I_D 와 ξ_o', η 으로 표현되므로 초기치를 장채널의 경우($\xi_o' = 0, \eta = 0$)로 가정하고 이를 이용하여 새로 계산된 I_D 와 ξ_o', η 값으로 수렴시켜나가는 반복법에 의하여 계산했다.

2. 시뮬레이션 결과 및 검토

표1은 본 모델의 GaAs MESFET의 DC특성 및 광전류 특성도출을 위한 계산에 사용된 파라미터 값을 나타낸다. 장채널과 단채널 소자에 대한 모의실험에는 $0.5\mu m$ 와 $5\mu m$ 의 채널길이를 선택하였고, 본 모델의 다양한 파라미터의 변화에 대한 특성을 보여주기 위해서 $N_D = 1 \times 10^{17}/cm^3$, 그리고 조사된 광에 대한 파라미터로는 $\Phi_0 = 1 \times 10^{20}/cm^2/s$, $\alpha = 2 \times 10^4/cm$ 의 값으로 모의 실험하였다. 그림 4와 5는 장채널과 단채널 GaAs MESFET의 게이트전압에 따른 드레인전류-드레인전압 특성을 광이 조사되었을 때와 조사되지 않았을 때를 비교하여 나타내었다. 두 그림에서 채널길이가 짧을수록 출력 컨덕턴스가 증가하는 현상과, 광이 조사됨으로써 전체 전류값을 증가시키는 결과를 보여준다. 그림 6과 7은 게이트전압에 따른 \square -드레인전압 및 \square -드레인전압 특성을 채널길이, $L = 5\mu m$ 와 $L = 0.5\mu m$ 에 대해 비교하였다. 2장에서 살펴본 바와 같이 ξ 는 본 모델의 2차원 효과를 나타내는 파라미터로서 모의 실험 결과에서 채널길이가 짧아질 때의 효과를 확인할 수 있다. 그림 8~11는 $V_{op}(0)$ 와 $V_{op}(L)$ 의 값을 V_{GS}, Φ_0 , 그리고 b 의 다양한 변화를 주어서 그 결과치를 나타내었다. 이때, 광기전력 V_{op} 는 조사된 광속밀도 Φ_0 의 값이 클수록, 게이트전압 V_{GS} 값이 역방으로 클수록, 그리고 채널 내 채널 두께 b 의 값이 작을수록 증가하는 경향을 보이고 있다. V_{op} 의 증가는 공핍층 폭 h 의 감소를 가져와 드레인전류 I_D 의 값을 증가시킬 것을 예상할 수 있다. 또한 그림 12~15은 $h(0)$ 와 $h(L)$ 의 값을 Φ_0, J_S , 그리고 L 의 값을 변화시켜서 그때의 결과값이다. 여기서 h 는 조사된 광속밀도 Φ_0 의 값이 클수록, 채널 길이 L 값이 작을수록, 그리고 Schottky 접합의 역방 포화 전류 밀도 J_S 의 값이 작을수록 감소하는 결과를 나타내며, 이는 그림 8~11의 V_{op} 의 결과로부터 예측할 수 있는 결과와 같은 결론을 이끌어낼 수 있다.

표 1. 계산에 이용된 파라미터의 차원 및 디폴트 값
Table 1. Parameter dimensions and default values for the calculation.

Parameter	Default Value	Dimension
채널 폭 Z	100	μm
채널 길이 L (단채널/장채널)	0.5/5	μm
채널 두께 b	0.4	μm
온도 T	300	K
자유공간의 유전율 ϵ_0	8.85×10^{-14}	F/cm
GaAs의 유전율 ϵ_1	$13.2 \times \epsilon_0$	F/cm
저전계 이동도 μ_0	8500	$\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$
전자의 포화 속도 v_{sat}	3×10^7	$\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$
채널 도핑 농도 N_D	1×10^{17}	cm^{-3}
조사된 광속 밀도 Φ_0	1×10^{20}	$\text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$
Schottky 접합의 역방 포화 전류 밀도 J_S	1×10^{-7}	A/cm^2
흡수 계수 α	2×10^4	cm^{-1}
GaAs 표면의 재결합속도 s_p	1×10^4	$\text{cm} \cdot \text{sec}^{-1}$
과잉 정공의 life time τ_p	1×10^{-8}	sec

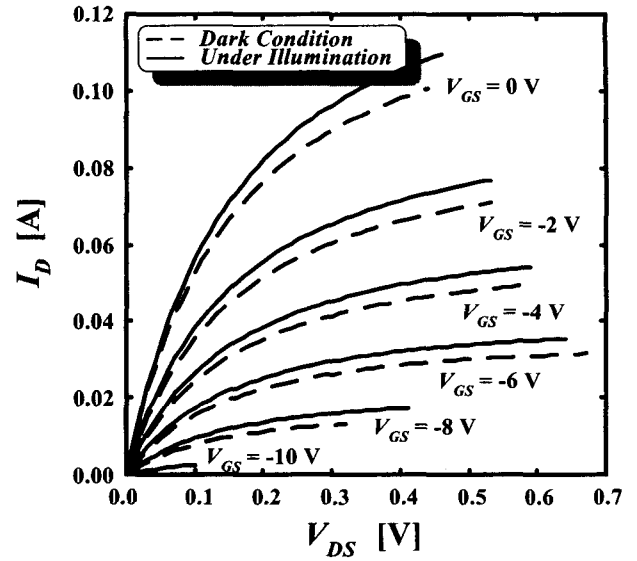


그림 4. 단채널 GaAs MESFET의 게이트전압에 따른 드레인전류-드레인전압 특성, 암전류(점선)와 광전류(실선)

Fig. 4. Short-channel drain current-drain voltage characteristics of GaAs MESFET for various gate voltages under dark condition (dot curve) and under illumination (solid curve).

($L=0.5\mu\text{m}$, $\Phi_0=1 \times 10^{20} \sim 0 / \text{cm}^2/\text{s}$)

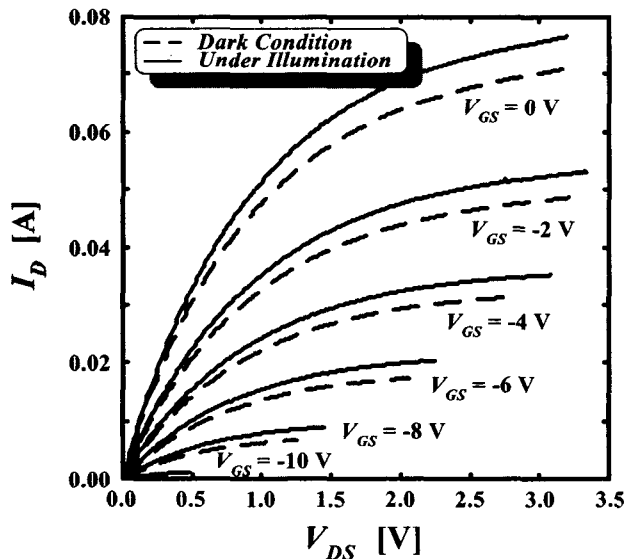


그림 3. 장채널 GaAs MESFET의 게이트전압에 따른 드레인전류-드레인전압 특성, 암전류(점선)와 광전류(실선)

Fig. 3. Long-channel current-drain voltage characteristics of GaAs MESFET for various gate voltages under dark condition (dot curve) and under illumination (solid curve).

($L=5\mu\text{m}$, $\Phi_0=1 \times 10^{20} \sim 0 / \text{cm}^2/\text{s}$)

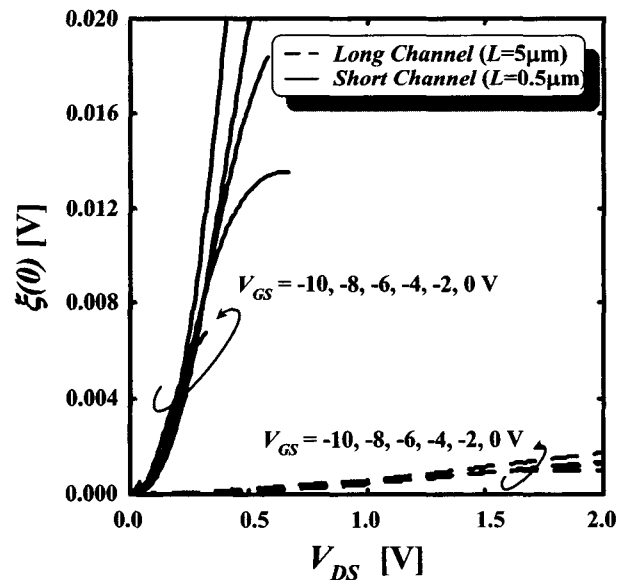


그림 5. GaAs MESFET의 게이트전압에 따른 파라미터 $\xi(0)$ -드레인전압 특성의 채널 길이에 대한 비교

Fig. 5. $\xi(0)$ -drain voltage characteristics of GaAs MESFET with $L=0.5\mu\text{m}$ and $L=5\mu\text{m}$ for various gate voltages.

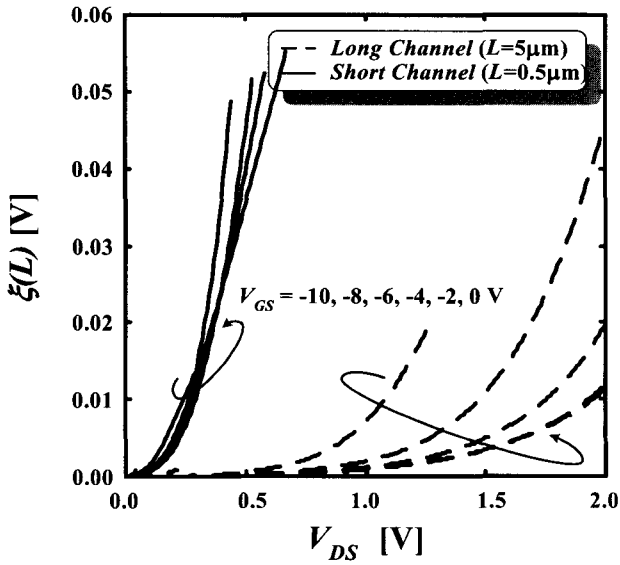


그림 6. GaAs MESFET의 게이트전압에 따른 파라미터 $\xi(L)$ -드레인전압 특성의 채널 길이에 대한 비교
 Fig. 6. $\xi(L)$ -drain voltage characteristics of GaAs MESFET with $L=0.5\mu m$ and $L=5\mu m$ for various gate voltages.

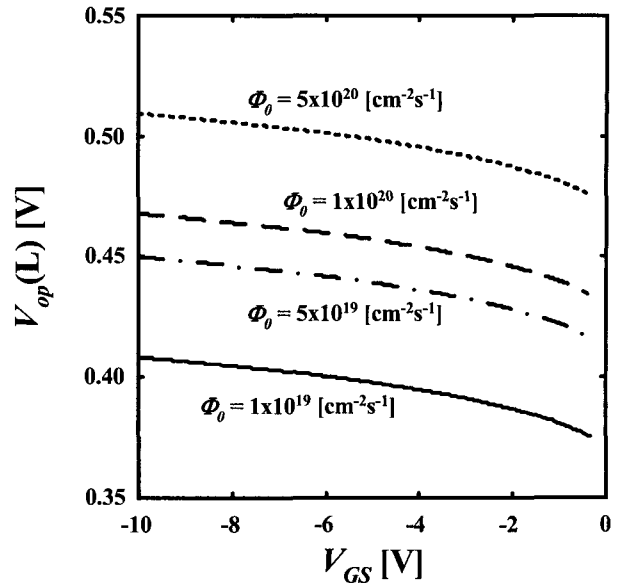


그림 8. GaAs MESFET의 Φ_0 에 따른 $V_{op}(L)$ -게이트전압 특성
 Fig. 8. $V_{op}(L)$ -gate voltage characteristics of GaAs MESFET for various values of Φ_0 . ($L=1\mu m, b=0.5\mu m, V_{DS}=1V$)

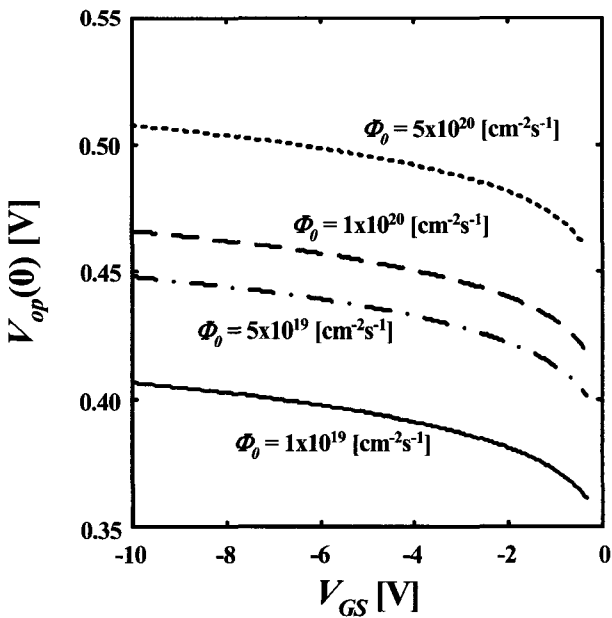


그림 7. GaAs MESFET의 Φ_0 에 따른 $V_{op}(0)$ -게이트전압 특성
 Fig. 7. $V_{op}(0)$ -gate voltage characteristics of GaAs MESFET for various values of Φ_0 . ($L=1\mu m, b=0.5\mu m, V_{DS}=1V$)

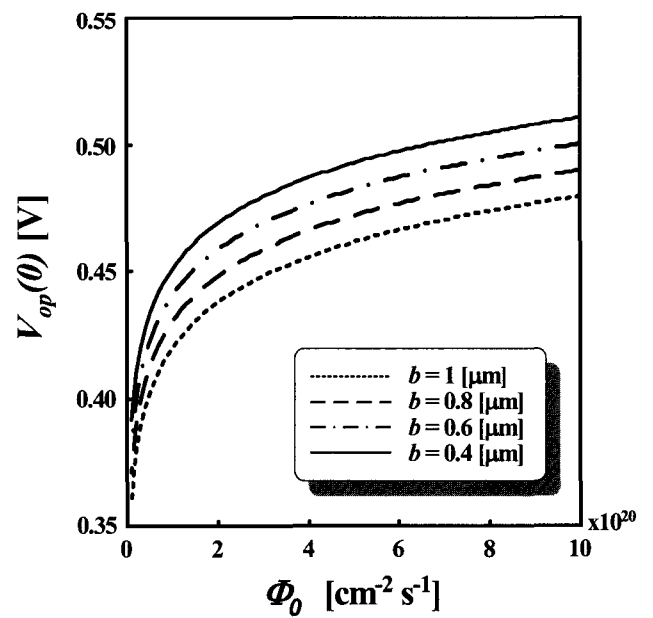


그림 9. GaAs MESFET의 b 에 따른 $V_{op}(0)$ - Φ_0 특성
 Fig. 9. $V_{op}(0)$ - Φ_0 characteristics of GaAs MESFET for various values of b . ($L=1\mu m, b=0.4\mu m, V_{GS}=-3V, V_{DS}=1V$)

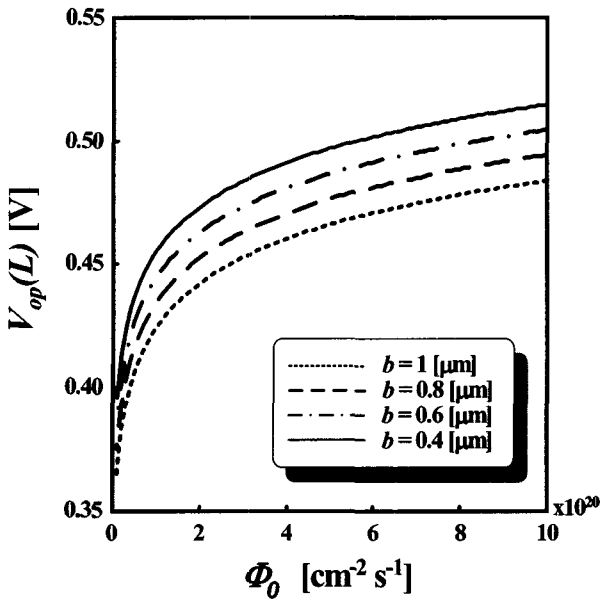


그림 10. GaAs MESFET의 b 에 따른 $V_{op}(L) - \Phi_0$ 특성
 Fig. 10. $V_{op}(L) - \Phi_0$ characteristics of GaAs MESFET for various values of b .
 ($L = 1 \mu m$, $b = 0.4 \mu m$, $V_{GS} = -3 V$, $V_{DS} = 1 V$)

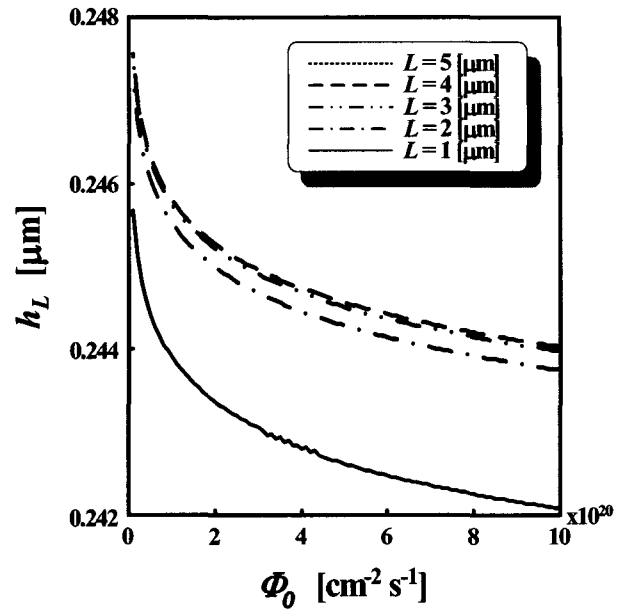


그림 12. GaAs MESFET의 L 에 따른 $h_L - \Phi_0$ 특성
 Fig. 12. $h_L - \Phi_0$ characteristics of GaAs MESFET for various values of L .
 ($L = 1 \mu m$, $b = 0.4 \mu m$, $V_{GS} = -3 V$, $V_{DS} = 1 V$)

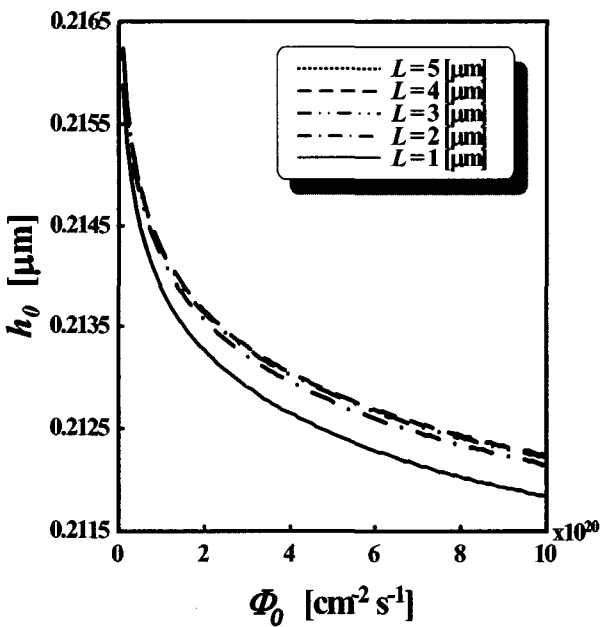


그림 11. GaAs MESFET의 L 에 따른 $h_0 - \Phi_0$ 특성
 Fig. 11. $h_0 - \Phi_0$ characteristics of GaAs MESFET for various values of L .
 ($L = 1 \mu m$, $b = 0.4 \mu m$, $V_{GS} = -3 V$, $V_{DS} = 1 V$)

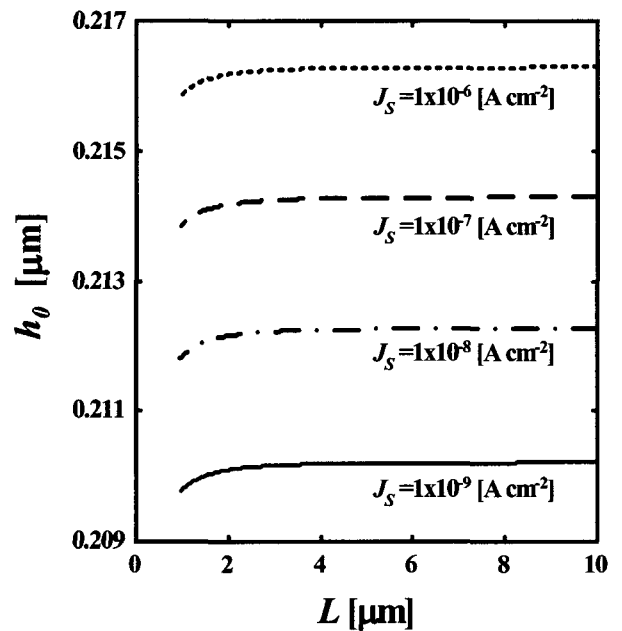


그림 13. GaAs MESFET의 J_S 에 따른 $h_0 - \Phi_0$ 특성
 Fig. 13. $h_0 - \Phi_0$ characteristics of GaAs MESFET for various values of J_S .
 ($L = 1 \mu m$, $b = 0.4 \mu m$, $V_{GS} = -3 V$, $V_{DS} = 1 V$)

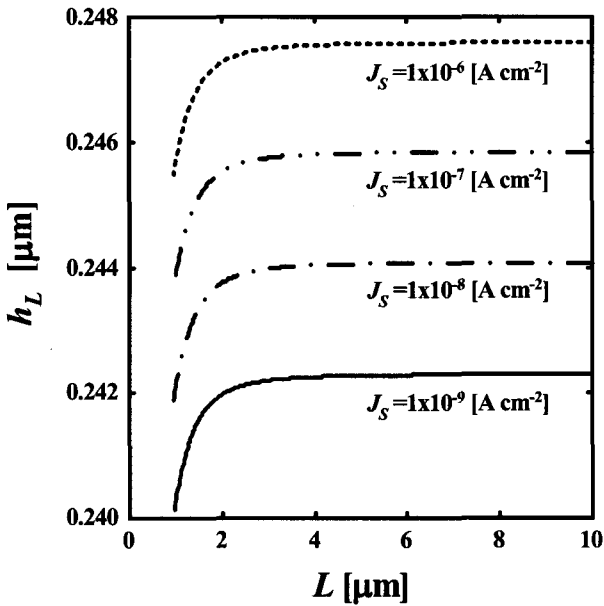


그림 14. GaAs MESFET의 J_s 에 따른 $h_L - \Phi_0$ 특성
 Fig. 14. $h_L - \Phi_0$ characteristics of GaAs MESFET for various values of J_s .
 ($L = 1 \mu m$, $b = 0.4 \mu m$, $V_{GS} = -3 V$, $V_{DS} = 1 V$)

IV. 결 론

앞서 제시한 시뮬레이션 결과는 단채널 MESFET의 암전류 및 광전류 특성이, 소자 치수 파라미터, b , L 및 N_D , 동작전압, 광 조사량, 광 흡수계수, 과잉정공수명 등의 여러 파라미터들에 대해 통일적으로 묘사되고 있음을 보이고 있다. 이들 시뮬레이션 결과를 직접적인 실험 데이터와 수치적으로 비교하는 것은 자료 부족으로 이루어지지 않았지만, 그 경향성은 예측한 바를 잘 따르게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 모델은 상당한 타당성을 갖고 있다고 보아지며, 이 방면의 연구에 대한 기초를 제공하였다고 보아진다.

본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- i) 게이트 매물형 GaAs MESFET의 광전류는 주로 공핍층 내의 광 기전력 발생에 따라 공핍층 폭의 축소에 기인하고, 중성영역의 다수 캐리어 밀도 증가에 의한 광 전도도 효과는 미약한 것으로 보인다.
- ii) 상기 결론에 따르면 채널의 폭이 크면 광의 조사가 공핍층에 미치는 영향이 작아지므로 채널 폭은 $0.5 \mu m$ 내외로 비교적 짧아야 함을 확인할 수 있었다.
- iii) 중성영역의 photo-conductivity의 영향을 미치는

- 반도체 표면의 조건 등은 본 소자의 광 전류특성에 별 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.
- iv) 광 기전력의 발생은 금속 게이트의 일함수 등, 포화 열전자 방출에 영향을 미치는 파라미터 값의 의존성이 큼을 확인했다.
- v) 단채널 MESFET의 암전류 특성에 대한 제안된 모델은 FET 소자의 단채널 효과의 설명에 유용하게 적용될 수 있다고 파악되었다.

참 고 문 헌

- [1] M. A. Itzler, C. S. Wang, S. McCoy, N. Codd, and N. Komaba, ECOC'98, 1998.
- [2] I. Watanabe, T. Nakata, M. Tsuji, K. Makita, T. Torikai, and K. Taguchi, J. Lightwave Tech., vol.18, no.12, 2000.
- [3] S. Bose, M. Gupta, R.s. Gupta, "Cut-off frequency and optimum noise figure of GaAs optically controlled FET", Microwave Opt. Technol. Lett. vol.26, no.5, pp.276-282, 2000.
- [4] C. Baack, G. Elze, and W. Wolf, "GaAs MESFET : A high speed optical detector," Electron Lett., vol. 13, p.193, July.1977.
- [5] J. C Gammel and J. M. Ballantyne, "The OPFET : A new high speed optical detector," in IEEE Int. Electron Device Meeting Dig., Washington, DC, Dec. 1978, pp. 120-123.
- [6] J. Graffeuil, P. Rossel, and H. Martinot, "Light induced effects in GaAs FET's," Electron Lett., vol. 15, pp.439-441, July 1979.
- [7] P. Sugete and Y. Mizushima, "High speed photoresponse mechanism of GaAs MESFET," Jpn. J. Appl. Phys., vol.19, pp. L27-L29, 1980.
- [8] A. A. De Salles and J. R. Forrest, "Initial observations of optical injection locking of GaAs metal semiconductor field-effect transistor oscillators," Appl. Phys. Lett., vol.38, pp.392-394, Mar. 1981.
- [9] A. A. A. de Salles, "Optical Control of GaAs MESFET's," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol.MTT-31, pp.812-820, Oct.1983.
- [10] H. Mizuno, "Microwave characteristics of an optically controlled GaAs MESFET," IEEE

- Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-31, pp. 567-600, July 1983.
- [11] G. J. Chaturvedi, R. L. Purohit, and S. L. Sharma, "Optical effect on GaAs MESFET's", *Infrared Phys.*, vol.23, pp.65-68, Jan.1983.
- [12] R. N. Simons, "Microwave performance of an optically controlled AlGaAs/GaAs high electron mobility transistor and GaAs MESFET," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-35, pp.1444-1455, Dec. 1987.
- [13] R. N. Simons and K. B. Bashin, "Analysis of optically controlled microwave/millimeter wave device structures," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 34, pp.1349-1355, Dec.1986.
- [14] R. B. Darling and J. P. Uyemura, "Optical gain and Large signal characteristics of illuminated GaAs MESFET", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, pp.1160-1171, July. 1987.
- [15] Shubha, B. B. Pal, and R. U. Khan, "Optically controlled ion-implanted GaAs MESFET characteristics with opaque gate," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 45, pp.78-84, Jan.1998.
- [16] A. A. A. de Salles, "Optical Control of GaAs MESFET's," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.MTT-31, pp.812-820, Oct.1983.
- [17] N. S. Ray, B. B. Pal, and R. U. Khan, "Analysis of GaAs OPFET with improved optical absorption under back illumination," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 46, pp.2350-2353, Dec. 1999
- [18] V. K. Singh, S. N. Chattopadhyay, and B. B. Pal, "Optically controlled characteristics of an ion-implanted silicon MESFET," *Solid State Electron.*, vol. 29, pp. 707-711, Aug. 1986.
- [19] P. Chakrabarti, "Comment on effect of radiation and surface recombination of an ion-implanted GaAs MESFET," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, P.2578, Nov. 1991.
- [20] P. Chakrabarti, "Comment on effect of radiation and surface recombination of an ion-implanted GaAs MESFET," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 38, P.2578, Nov. 1991.
- [21] P. Chakrabarti, R. Anand, and V. S. Rao, "I-V characteristics of an optically controlled Si-MESFET," *Solid State Electron.*, vol. 35, pp.587-592, Apr. 1992.
- [22] P. Chakrabarti, N. L. Shrestha, S. Srivastava, and V.Khemka, "An improved model of an ion-implanted OPFET," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol.39, pp.2050-2059, Sept. 1992.
- [23] S. N. Mohamed, M. S. Unlu, and H. Morkoc, "Optically controlled current voltage characteristics of an ion-implanted MESFET," *Solid State Electron.*, vol. 33, pp.1499-1509, Dec. 1990.
- [24] A. Madjar, A. Paoletta and P. R. Herczfeld, "Analytical model for optically generated currents in GaAs MESFET's," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 0, pp.1681-1691, Aug. 1992.
- [25] P. Chakrabarti, S. K. Srestha, A. Srivastava, and D. Saxena, "Switching characteristics of an optically controlled GaAs MESFET," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp. 365-375, Mar. 1994.
- [26] P. Chakrabarti, A. Gupta, and N. A. Khan, "An analytical model of GaAs OPFET," *Solid State Electron.*, vol. 39, pp.1481-1490, Oct. 1996.
- [27] A. Madjar, A. Paoletta, and P. R. Herczfeld, "Modeling the optical switching of MESFET's considering the external and internal photo-voltaic effects," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, pp.62-67, Jan. 1994.
- [28] 조남홍, 광계달, "4 단차 GaAs MESFET Model의 SPICE 탑재," 대한전자공학회논문지, 제31권 A편 제1호, pp. 39-47, 1994
- [29] 노태문, 김영식, 김영웅, 박위상, 김범만, "바이어스 효과를 포함하는 GaAs MESFET의 새로운 비선형 채널전류 모형," 대한전자공학회논문지, 제34권 D편 제4호, pp. 17-26, 1997
- [30] 박정욱, 김재인, 서정하, "선형 공핍층 근사를 이용한 단채널 GaAs MESFET의 전류 전압 특성 연구," 대한전자공학회논문지, 제37권 TE편 제2호, pp. 6-11, 2000

저 자 소 개

김 정 문(정회원)

명지대 전자공학과 졸업.

홍익대 전자공학과 공학박사.

현재 제주산업정보대학 정보통신과 부교수.

<주관심분야 : 광통신>

서 정 하(정회원)

1970년 2월 서울대학교 전자공학과 공학사.

1975년 2월 홍익대학교 전기공학과 공학석사.

1981년 2월 서울대학교 전자공학과 공학박사.

1979년~1980년 미국 University of Minnesota 객
원 연구원.

1984년~1985년 미국 University of Pennsylvania
Post-Doctor.

1974년~현재 홍익대학교 전자공학과 교수.

<주관심분야 : 반도체물성 및 공정, 화합물 반도체
소자, 집적회로>

