

論文 95-32A-11-7

자기신호처리 적외선 감지소자의 2차원 수치해석

(A Two-dimensional Numerical Simulation of Self-signal Processing Infrared Detectors)

趙南洪*, 郭桂達*

(Nam Hong Jo and Kae Dal Kwack)

요 약

본 논문에서는 자기신호처리 적외선 감지소자의 전기·광학적 특성을 해석하고 감지성능을 평가하기 위해 2차원 수치해석 시뮬레이터를 개발하였다. 소자 해석을 위해 소자의 전위 분포를 계산하기 위한 포아송 방정식과 광학적 생성과 재결합 모델을 포함하는 전자 및 정공에 대한 전류 연속 방정식을 해석하였다. 다양한 read-out 구조를 해석하기 위해 자동 삼각형 그리드 생성기를 개발하였으며, 해의 빠른 수렴성을 위해 Newton 알고리즘을 이용하였다. 이 시뮬레이터를 이용하여 캐리어 주행시간 차이와 주행속도에 따른 공간해상도 효과를 bifurcate와 horn 구조에 대해 각각 제시하였다. 아울러 인가전계 및 배경의 시계에 따른 소자의 응답도, 노이즈, 감지도를 계산하였다. 얻어진 결과는 실험치와 비교적 잘 일치하였고, horn 구조가 bifurcate 구조에 비해 보다 우수한 공간해상도 및 감지성능을 가지게 됨을 확인하였다.

Abstract

We developed a two-dimensional numerical simulator which can analyze the electrical as well as optical characteristics and evaluate the detection performances of self-signal processing infrared detectors. It solves the poisson equation and the electron, hole current continuity equations including the optical generation and recombination models. To speed up convergency rate, the Newton algorithm is used. Automatic triangular grid generator make it easy to simulate the devices with the various read-out geometries. This simulator can show the variation of spatial resolution which is caused by the transit velocity and transit time dispersion in bifurcate and horn geometries respectively. Also, we calculated the responsivity, noise, and detectivity in respect of the applied electric field and background field-of-view. The results obtained from simulation correspond to those of experiments, and it is verified that horn read-out geometry has the superior spatial resolution and detection performance to bifurcate geometry.

I. 서 론

물체에서 방출되는 적외선 영역의 고유한 복사에너지를 검출함으로써 빛이 존재하지 않는 야간에서도 화상을 식별 가능한 화면으로 재현하는 열 화상 시스템

에 널리 사용되고 있는 자기신호처리 적외선 감지소자 (Self-signal Processing InfraRed detector : SPIR detector)는 기존의 분리형 소자에서 요구되던 시간지연 및 적분회로의 구성을 소자 자체 내에서 해결, 주변 회로의 구성을 최소화하고 높은 S/N (Signal-to-Noise)비를 얻을 수 있다는 장점으로 인해^{1,9)}

그 응용 범위가 점차 확대되고 있다. 적외선의 대기 투과 특성이 뛰어난 파장 범위(3~5 μm , 8~13 μm)를 조성비에 따라 조절 할 수 있는 H₂₁-xCd_xTe 물질로 제

* 正會員, 漢陽大學校 電子工學科

(Electronic Engineering Dept., Hanyang Univ.)

接受日字: 1994年12月30日, 수정완료일: 1995年11月3日

작되는 SPIR 소자는 입사신호에 의해 생성된 캐리어가 양단에 인가된 전계에 의해 전송되는 속도와 화상신호의 주사속도를 일치시킴으로써 캐리어가 소자 내에서 자동적으로 적산되는 원리를 이용하여 신호를 증폭하고, read-out 영역에 도달한 캐리어 밀도에 따른 read-out 영역의 저항 변화를 전위탐침을 통해 전위 변화로 검출함으로써 출력신호를 얻게 된다.

SPIR 소자의 성능을 결정짓는 감지성능 및 공간해상도는 적산된 캐리어의 밀도와 read-out 영역에서의 캐리어 분포도에 의해 좌우된다. 그러나, 이는 캐리어의 수명시간, 확산계수, 캐리어의 이동속도와 주사속도의 정합 여부, 소자의 크기, 동작조건, 배경 복사량, read-out 영역의 기하학적 구조 등 여러가지 요인들에 의해 영향을 받기 때문에 기존의 해석적인 모델^{1, 2, 3, 19)}을 사용할 경우 정확한 해석은 어려워진다. 특히, 해석적인 방법을 사용할 경우 read-out 영역의 기하학적 구조에 따른 전계 분포의 변화, 캐리어 주행시간 차이에 의한 공간해상도의 저하, 적산에 따른 캐리어의 확산효과, 감지성능의 변화 등의 해석은 거의 불가능하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 SPIR 소자의 동작 조건이나 기하학적 구조에 구애받지 않는 소자 해석을 위해 2차원 수치해석 시뮬레이터를 개발하고, 이를 이용하여 다양한 조건하에서 소자의 공간해상도 및 감지성능을 평가하고자 한다. 이를 위해 read-out의 구조에 제한받지 않고 사선에서도 분할이 용이한 자동 삼각형 그리드 생성기의 개발, 특성 방정식의 이산화 및 물리적 모델의 탑재, 보다 빠른 해의 수렴속도를 얻기 위한 Newton 해법의 사용, Sparse 행렬로 인한 메모리의 낭비를 막기 위한 YSMP(Yale-Sparse Matrix Package) 알고리즘의 구현 등 일련의 과정들을 구현하고자 한다.

서론에 이어 II에서는 SPIR 소자를 해석하기 위한 특성 방정식과 이에 사용되는 물리적, 수학적 모델에 관해 언급하고 III에서는 특성 방정식의 이산화 및 수치해석 과정에 대해 설명하고, IV에서는 시뮬레이션 결과를 제시하는 것으로 본 논문은 구성된다.

II. 특성 해석 모델

본 장에서는 SPIR 소자 해석을 위해 사용한 특성 방정식에 대해 설명하고, 방정식에 사용한 각종 물질

파라미터 및 생성-재결합 모델에 관해 설명하고자 한다.

1. SPIR 소자의 특성 방정식

반도체 소자 내부의 전기적 특성을 지배하는 특성 방정식은 전위 분포를 지배하는 포아송 방정식(1)과 전자 및 정공의 농도 분포를 지배하는 전자 및 정공 전류연속 방정식(식 2, 3)으로 구성된다^{18, 19)}.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla \phi) = -\rho = -q(p - n + N_D^- - N_A^-) \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n + G_n - R_n = \frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_n + U_n \quad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p + G_p - R_p = -\frac{1}{q} \nabla \cdot \vec{J}_p + U_p \quad (3)$$

여기서 ϕ 는 전위, ϵ 는 유전율, q 는 전하량, p, n 은 각각 정공 및 전자 농도, N_D^-, N_A^- 는 각각 이온화된 도너와 억셉터 농도를 나타낸다. \vec{J}, G, R 은 각각 전류 밀도, 캐리어 생성율 및 재결합율을, $\frac{\partial n}{\partial t}, \frac{\partial p}{\partial t}$ 는 시간에 따른 전자 및 정공의 농도 변화를 각각 나타낸다. 전류 밀도는 전계에 의한 캐리어의 표류와 캐리어 농도 기울기에 의한 확산항으로 구성되며 아래와 같다.

$$\vec{J}_n = -q\mu_n \nabla \phi + qD_n \nabla n \quad (4)$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p \nabla \phi - qD_p \nabla p \quad (5)$$

여기서 μ_n 과 μ_p 는 각각 전자와 정공의 이동도이며 D_n 과 D_p 는 전자와 정공의 확산 계수이다. 이동도 모델은 균일한 저전계 진성 이동도(μ_m)로부터 불순물 산란에 의한 이동도 감소를 고려한 아래의 모델¹⁵⁾을 사용한다.

$$\frac{1}{\mu_n(x, y)} = \frac{1}{\mu_m} + \frac{1}{\mu_n(x, y)} \quad (6)$$

불순물 산란 모델로는 파인 캐리어 생성에 따른 이동도의 변화를 고려하기 위해 Brooks-Herring¹⁴⁾ 방법을 이용하였다.

$$\mu_n(x, y) = \frac{64 \epsilon_n^2 (2kT)^{3/2}}{q^3 N_{R(x, y)}} \sqrt{\frac{\pi}{m^*}} g_n \left[\frac{24 m^* \epsilon (kT)^2}{q^2 \hbar^2 (n + \beta)} \right] \quad (7)$$

$$g_n(x) = \frac{1}{\ln(1+x) - (\frac{x}{1+x})} \quad (8)$$

여기서 N_f 는 이온화된 도너 및 억셉터 농도이며, 전자의 실효질량 m_r^* 은 아래로

$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{AP^2}{3\hbar^2} \frac{(\Delta_{so} + 3/2E_k)}{E_k(\Delta_{so} + E_k)} \quad (9)$$

$$E_p = \frac{2m_n}{\hbar^2} P^2 = (18+0.3x) \text{ (eV)} \quad (10)$$

$$\Delta_{so} = 0.893+0.615x \quad (11)$$

주어진다. x 는 조성비, Δ_{so} 는 spin-orbit splitting 전위, P 는 Momentum Matrix element^[14]로 (10)식을 이용하여 계산하였다. 정공의 유효 질량은 $m_h^* = 0.55 m_0$ 로 가정하였다. 조성비 x 와 온도 T 에 따른 밴드갭 에너지 E_g 및 진성 캐리어 농도의 계산은 Hansen and Smith의 모델식을^[13] 이용하였고, 확산계수 D 는 Einstein 관계식^[14]을 이용하였다.

2. 광학적 생성 및 재결합 모델

SPIR은 서론에서도 언급하였듯이 물체에서 발산하는 복사에미턴스를 검출하기 위한 소자이므로 소자 내부에서의 캐리어의 생성 및 재결합은 소자의 성능을 결정하는 주요한 인자가 된다. 전류 연속방정식의 캐리어 생성율(G)와 재결합율(R)의 모델로 각각 광학적 생성 모델과 Auger 재결합 모델을 이용한다.

먼저 일정 온도 T_H 를 갖는 물체의 복사량을 물체가 흑체라는 가정아래 Planck 모델을 이용하여 복사에미턴스 $Q^{BS(A)}$ 를 계산하고, 반사계수 $R(\lambda)$ 와 흡수계수 $\alpha(\lambda)$, 감지기의 시계(field-of-view) θ 를 고려할 때 소자내의 광학적 생성율은 다음과 같다.

$$G_{opt} = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_0^{\lambda_c} (1-R(\lambda)) Q^{BS(A)} \alpha(\lambda) \exp(-\alpha(\lambda)y) d\lambda \quad (12)$$

여기서 λ_c 는 차단파장(Cut-off wavelength), y 는 소자 표면으로부터의 거리이다. 파장 λ 에 따른 흡수계수와 반사계수의 계산으로는 각각 참고문헌^[16,17]의 모델을 이용한다. 그러나, SPIR 소자의 2차원 수치해석은 입사표면 ($y=0$)만을 고려하기 때문에 (12)식을 그대로 사용할 경우 신호가 소자의 두께 방향으로 진행하면서 캐리어의 생성율이 감소되는 효과를 고려하지 못함에 따라 소자의 두께 D 에 대한 적분을 통해 평균값을 취하는 방법을 이용하여 아래로 수정하였다.

$$G_{opt} = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_0^{\lambda_c} (1-R(\lambda)) Q^{BS(A)} \frac{1}{D}(1-\exp(-\alpha(\lambda)D)) d\lambda \quad (13)$$

소자의 상태가 불순물에 의해 오염되지 않은 경우를 가정할때 캐리어의 수명시간은 주로 Auger 메커니즘에 의해 영향을 받으며, 일반적으로 HgCdTe에서는 Auger 1과정과 Auger 7과정이 주도적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Auger 재결합 모델은 아래와 같다.

$$R_{Aug} = [G_{Ac} \cdot n + G_{Ah} \cdot p] [5pn - n_c^2] \quad (14)$$

G_{Ac} 는 전자 Auger 계수로 참고문헌^[15]을 이용하였고, 정공 Auger 계수인 G_{Ah} 는 아래의 관계식^[18]을 사용하여 구하였다.

$$\frac{G_{Ac}}{G_{Ah}} \approx 6 \frac{1 - 5 E_g / 4kT}{1 - 3 E_g / 2kT} \quad (15)$$

III. 수치해석 방법 및 절차

소자 내에서의 전위 및 캐리어 농도의 분포를 결정하는 포아송 방정식과 전류 연속 방정식의 해는 서로 복잡하게 얽혀 있기 때문에 해석적인 방법으로 직접 해를 구한다는 것은 사실상 불가능하게 된다. 따라서 수치해석적인 방법이 도입되어야 한다. 수치해석법은 소자의 영역을 미소 면적으로 분할한 각각의 영역에서 미분 방정식으로 주어지는 특성방정식을 이산화라는 과정을 통해 행렬로 구성되는 대수 방정식으로 전환하고 행렬의 해를 얻음으로써 소자 내부의 전위 및 전계 분포, 캐리어 농도등 소자 해석의 유용한 정보를 얻는 방법을 말한다. 본 장에서는 이러한 일련의 과정들을 순서별로 서술하고 전체 시뮬레이션 절차에 대해 설명한다.

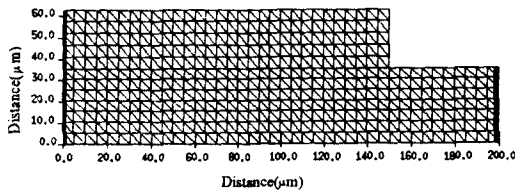
1. 그리드 생성

수치해석의 첫 단계인 그리드 생성은 소자 내부의 위치에 따른 해를 얻기 위해 소자의 영역을 분할하는 과정이다. 영역을 분할한 각각의 꼭지점은 노드라 불리며 수치해석을 통해 얻고자 하는 물리량들 중 해당되는 위치에서의 전위 및 캐리어 농도를 나타내는 대표 값이 된다.

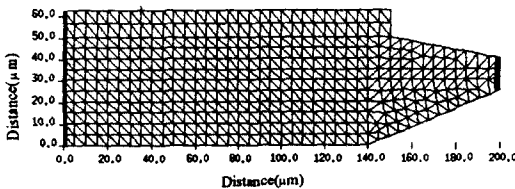
소자의 분할 구조는 사각형 구조와 삼각형 구조가 가장 널리 사용되어 지는데, 사각형 그리드의 경우 SPIR 소자처럼 곡선이나 사선 형태를 갖는 경우엔 분할이 어렵다는 단점^[7]을 가지기 때문에 본 논문에서는 사선이나 곡선 구조에서도 분할이 용이한 삼각형

그리드 구조를 사용한다. 삼각형 그리드 생성 알고리즘은 Lo^[5]에 의하여 제안된 방법과 Sadek^[6]에 의해 제안된 방법을 기초로 한다. 삼각형 생성의 첫 과정은 소자의 형태를 서술하는 뼈대(Skeleton)^[7]에 대한 정보로부터 영역의 경계면에 경계노드를 형성시키는 것이다. 이렇게 형성된 경계노드 중 두개의 노드를 선택하여 영역을 분할하는 직선을 그린 후 이 직선상에 새로운 노드를 생성한다. 분할 직선에 의해 나누어진 각각의 영역을 다시 분할하고 새로운 노드를 추가하는 과정을 모든 영역이 삼각형으로 분할될때까지 끊임없이 반복함으로써 전 영역을 완전히 분할하게 된다.

그림 1은 본 알고리즘에 의해 구성된 그리드의 분할의 예로 SPIR 소자에서 가장 널리 쓰여지고 있는 bifurcate 구조와 horn 구조를 분할한 모양으로 직선 뿐 아니라 사선을 갖는 horn 구조에 있어서도 용이하게 분할됨을 잘 나타내고 있다. 아울러 그리드 생성의 결과는 각 노드에 할당되는 면적이 균일하여야 보다 높은 해의 정확도를 기대 할 수 있다는 관점에서 생성된 삼각형은 균일하여야 하며 둔각(obtuse) 삼각형의 발생을 또한 낮아야만 한다. 이러한 관점에서 볼 때, 그림 1.(a)에서의 둔각 삼각형의 생성률은 0%, (b)에서의 둔각 삼각형 발생률은 0.7%로 그리드 생성 결과는 우수하다고 평가 할 수 있다.



(a)



(b)

그림 1. (a) Bifurcate read-out 구조의 그리드 생성 (b) Horn read-out 구조의 그리드 생성

Fig. 1. (a) Grid generation of bifurcate read-out geometry. (b) Grid generation of horn read-out geometry.

2. 특성 방정식의 이산화

II장에서 제시한 특성 방정식인 포아송 방정식과 전류 연속 방정식의 이산화를 위해 이산화 과정이 간편하면서도 물리량의 연속이라는 개념에 부합되는 Gauss 법칙을 이용한 Boxed Method^[8,9]를 이용하고자 한다. Boxed Method의 개념을 설명하자면 위치에 종속되는 미분방정식이 아래와 같을때

$$\nabla \cdot \vec{F}(x, y) = u(x, y) \quad (16)$$

Gauss 법칙에 따라 윗식을 그림 2에 나타낸 임의의 한 노드를 둘러싼 제어체적(control volume)로 적분하면 아래의 식을 얻게 된다.

$$\iint_A \nabla \cdot \vec{F} dx dy = \int_{C_i} \vec{F} \cdot \vec{n} ds = \iint_A u(x, y) dx dy \quad (17)$$

여기서 A는 제어면적의 경계(perimeter) C_i로 둘러싸인 제어면적이며, \vec{n} 은 제어 면적의 경계에 수직한 단위 벡터이다.

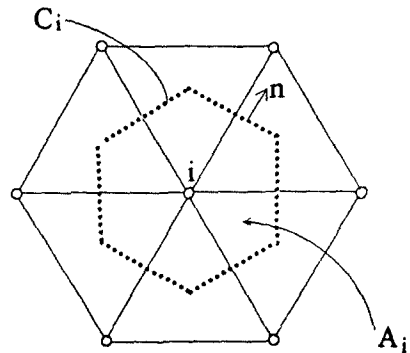


그림 2. Gauss 법칙을 적용한 부분영역
Fig. 2. Local region of application of Gauss's law.

이 개념을 먼저 포아송 방정식에 적용하면 아래와 같이 주어진다.

$$\iint_A \nabla \cdot (-\epsilon \nabla \phi) dx dy = \int_C \epsilon \vec{E} \cdot \vec{n} ds = \iint_A \rho dA \quad (18)$$

윗식을 노드 i를 둘러싼 각각의 삼각형 t로 적분구간을 분할하면 아래와 같고,

$$\sum_t \int_C \epsilon \vec{E} \cdot \vec{n} ds' = \sum_t \iint_{A'} \rho dA' \quad (19)$$

좌변의 선적분 ds'은 그림 3으로 방향벡터와 계수를 정의할 때 아래로 정리된다.

$$\int_C \varepsilon \vec{E} \cdot \vec{n} ds' = \varepsilon \frac{\phi_i - \phi_k}{d_k'} h_k' - \varepsilon \frac{\phi_k - \phi_i}{d_i'} h_i' \quad (20)$$

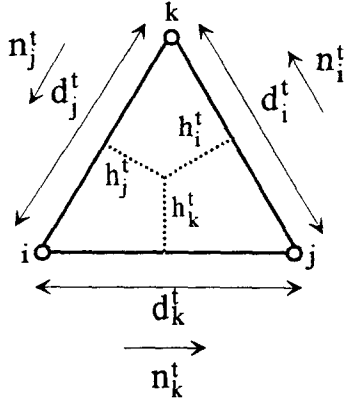


그림 3. 수직 이등분선에 의한 삼각형의 분할
Fig. 3. Partitioning of a triangular element by perpendicular bisectors.

여기서 $\phi_{i,j,k}$ 는 해당 노드의 전위이며 d 는 점자에 해당하는 맞은편 변의 길이, h 는 각 변에에서의 수직 이등분선의 길이이다. ρ 의 적분은 삼각형 요소를 이루는 각 변에서의 수직 이등분선인 h_j^t, h_k^t 에 의해 둘러싸인 면적 A_i' 로 쉽게 주어진다. 따라서, 노드 i 에서의 선형 방정식은 식(19)와 (20)에 의해 아래로 주어진다.

$$(F_i)_i = \sum_j \left(\varepsilon \frac{\phi_j - \phi_i}{d_k'} h_k' + \varepsilon \frac{\phi_k - \phi_i}{d_i'} h_i' + \rho A_i' \right) = 0 \quad (21)$$

전자 전류 연속방정식도 위와 마찬가지로 Gauss 법칙을 이용하여 정리하고,

$$\sum [\int_C \vec{J} \cdot \vec{n} ds' - \int_A q \left(\frac{\partial n}{\partial t} + U_n \right) dA'] = 0 \quad (22)$$

전류모델로 (4)식을 사용하여 Schafetter-Gummel¹⁰⁾ 방법으로 정리하면 아래의 이산화 방정식을 얻을 수 있다.

$$(F_n)_i = \sum_j \left[\frac{q\mu\beta}{d_k} h_k' \left\{ (n_i - n_j) B \left(\frac{\phi_j - \phi_i}{\beta} \right) - \frac{\phi_j - \phi_i}{\beta} n_i \right\} + \frac{q\mu\beta}{d_i'} h_i' \left\{ (n_i - n_k) B \left(\frac{\phi_k - \phi_i}{\beta} \right) - \frac{\phi_k - \phi_i}{\beta} n_i \right\} - q \left(\frac{\partial n}{\partial t} + U_n \right) A_i' \right] = 0 \quad (23)$$

$$\beta = \frac{kT}{q}, \quad B(x) = \frac{x}{e^{x-1}} \quad (24)$$

위의 유도과정과 마찬가지로 정공전류 연속방정식을 이산화하면 아래와 같다.

$$(F_p)_i = \sum_j \left[\frac{q\mu\beta}{d_k} h_k' \left\{ (p_i - p_j) B \left(\frac{\phi_j - \phi_i}{\beta} \right) - \frac{\phi_j - \phi_i}{\beta} p_i \right\} + \frac{q\mu\beta}{d_i'} h_i' \left\{ (p_i - p_k) B \left(\frac{\phi_k - \phi_i}{\beta} \right) - \frac{\phi_k - \phi_i}{\beta} p_i \right\} - q \left(\frac{\partial p}{\partial t} + U_p \right) A_i' \right] = 0 \quad (25)$$

이렇게 구한 식(21), 식(24, 25)의 대수 방정식을 그리드 생성에 의해 나누어진 전체 노드에 적용하면 행렬로 구성되는 전체 대수 방정식을 얻게 된다.

3. 행렬의 해법 및 저장 알고리즘 구현

각 노드의 해를 얻기위한 행렬의 기본 구성 형태는 포아송 방정식의 대수 방정식 (21)식과 전자 및 정공 연속 방정식의 대수 방정식 (24, 25)식을 순차적으로 푸는 Gummel 방법 대신에 빠른 수렴속도를 얻기 위해 이들 방정식을 한꺼번에 푸는 Newton¹¹⁾ 방법을 사용할 때 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F_\psi}{\partial \psi} & \frac{\partial F_\psi}{\partial n} & \frac{\partial F_\psi}{\partial p} \\ \frac{\partial F_n}{\partial \psi} & \frac{\partial F_n}{\partial n} & \frac{\partial F_n}{\partial p} \\ \frac{\partial F_p}{\partial \psi} & \frac{\partial F_p}{\partial n} & \frac{\partial F_p}{\partial p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \psi \\ \Delta n \\ \Delta p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_\psi \\ F_n \\ F_p \end{bmatrix} \quad (26)$$

원하는 해는 위 행렬에서 구한 해와 초기값 ψ_0, n_0, p_0 로부터

$$\psi = \psi_0 + \Delta \psi, \quad n = n_0 + \Delta n, \quad p = p_0 + \Delta p \quad (27)$$

해를 update 하고 다시 이 값을 대수 방정식의 초기값으로 대입하는 과정을 반복함으로써 얻을 수 있다.

행렬을 전체 노드에 대해 구성할 때 사각형 그리드와는 달리 삼각형 그리드 구조는 커다란 sparse 행렬을 가지게 되는데 많은 제로항을 모두 저장한다는 것은 메모리의 낭비를 가져온다. 따라서 0이 아닌 항만을 일차원 어레이로 저장, 불필요한 메모리의 낭비를 막기위해 YSMP¹¹⁾에서 사용하고 있는 포인트 어레이 방법을 적용하여 구현하고자 한다. 행렬의 해를 구하기 위한 과정은 크게 Symbolic 행렬의 구성, Symbolic LU factorization, Numeric LU factorization의 과정으로 나누어진다. 여기서 symbolic은 0이 아닌 행렬의 요소값이 저장될 위치를 미리 구성하는 것으로 그리드 구조가 바뀌어지지 않는 한 변하지 않게 된다. symbolic 행렬은 전체 노드를 순회(sweep)하면서 노드간의 연결상태 파악(예를들어 임의의 i 노드에서 행렬을 구성할때 i 노드와 연결되어

있지 않는 노드는 i행과 j열의 요소값이 0이 된다.)을 통해 0이 아닌 행렬의 요소값이 저장될 위치를 나타내는 AJ(J) 어레이와 AJ(J)의 시작번지 포인터인 AP(J) 어레이로 구성된다. 예를 들어 아래와 같은 행렬의 경우는

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & a_{42} & 0 & a_{44} & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & a_{55} \end{pmatrix}$$

아래로 저장된다.

J	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
AP	1	4	8	12	14										
AJ	1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	5	2	4	3	5
A	a ₁₁	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₂	a ₂₂	a ₂₃	a ₂₄	a ₂₃	a ₃₃	a ₃₅	a ₃₅	a ₄₂	a ₄₄	a ₄₄	a ₅₃

Symbolic LU factorization은 LU로 분해된 행렬의 요소값이 저장될 위치를 미리 만들어 주는 것으로, 저장법은 앞서 서술한 포인터 어레이 구성법과 동일하다. Numeric LU factorization은 Crout 알고리즘¹²⁾을 사용하여 A행렬로부터 LU 행렬의 각 요소값을 계산하고 해를 얻는 과정으로 구성된다.

4. 시뮬레이션 절차

전체 시뮬레이션의 구성과 절차를 그림 4의 흐름도에서 간략히 나타내었다. 먼저 시뮬레이션 하고자 하는 소자의 사양, 조성비, 온도, 입사신호, 바이어스 등에 관한 정보를 서술하고 있는 입력카드를 읽은 뒤, 이러한 정보를 바탕으로 소자의 영역을 분할하고, 분할 영역에서의 에너지 갭, 진성 캐리어 농도, 유효질량 등 물리적 파라미터를 계산한다. 이어서 해를 얻기 위한 전처리 과정인 symbolic factorization의 과정을 통해 포인터 어레이를 구성한다. 그리고 초기조건과 물리적 모델을 이용하여 각 이산화 방정식과 그 계수를 계산하고, 앞서 구성된 포인터 어레이를 이용하여 행렬의 요소값으로 저장한다. 이렇게 구성된 행렬로부터 구한 해가 수렴조건에 만족할 때까지 해의 update 과정을 반복하여 정확한 해를 얻는다. 마지막으로, 해의 결과를 도대로 전개, 속도, 생성율, 재결합, 전위, 캐리어 농도 등에 관한 정보들을 제시하고, 이를 바탕으로 소자의 성능 평가 결과를 제시하는 것으로 본 시뮬레이션은 구성되어 있다.

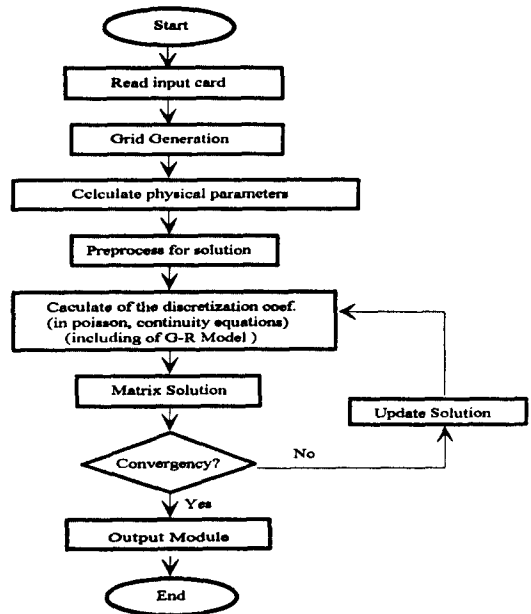


그림 4. 시뮬레이션 흐름도
Fig. 4. Flowchart of simulation.

IV. 시뮬레이션 결과 및 검토

1. Read-out 구조에 따른 공간해상도 평가

SPIR 소자의 성능을 좌우하는 요소 중의 하나인 공간해상도는 배경으로부터 인접한 화상들을 각각 분리하는 능력으로 설명 할 수 있는데, 설명 화상의 주사속도와 광학적으로 생성된 캐리어의 이동속도가 소자 전 영역에 걸쳐 정합 된다고 하여도 read-out 영역에서 화상을 분해하는 성능은 캐리어의 확산, read-out 영역의 기하학적 구조에 따른 주행시간차, read-out 영역에서의 이동속도 등에 의해 각각의 출력신호는 인접한 화상에 의해 영향을 받게되며 이러한 현상이 극심할 경우 열 화상 시스템의 구성시 화상의 번짐을 초래하게 된다. 먼저, 소수 운반자의 확산길이는 화상을 분리 할 수 있는 대상(target)의 최소거리를 결정짓는 주 요인이 되는데, n형 HgCdTe를 사용하는 SPIR 소자의 경우 낮은 정공 이동도에 의해 수명은 길면서도 적산영역에 비해 짧은 확산거리를 유지하며, 아울러 read-out 길이를 확산거리의 2배 보다 작게하여 샘플링 하기 때문에 통상 확산에 의한 분해성능은 예측 할 수 있다. 그러나, 실제 측정되는 분해성능은 예측보다

더 저하되는 것으로 알려져 있으며, 이는 갑작스럽게 감지기의 폭이 줄어드는 read-out 영역의 기하학적 형태에 따른 불균일한 전계와 주행경로 차이에 의해 캐리어의 주행속도가 일치하지 않기 때문이다. 따라서 주행시간의 편차를 최소화 하기 위한 read-out 구조의 설계가 요구된다. 이를 위해 본 논문에서는 특성 방정식의 해를 통해 각 위치에서의 전위와 캐리어 농도를 결정하고, 이로부터 등전위선과 전류 흐름도를 그린 후 경로별로 캐리어의 주행시간을 계산하였다.

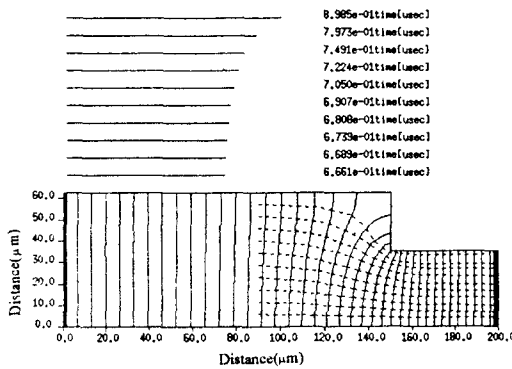


그림 5. Bifurcate read-out 구조에서의 등전위 및 주행시간 분포

Fig. 5. Distributions of the equi-potential and transit time in bifurcated read-out geometry.

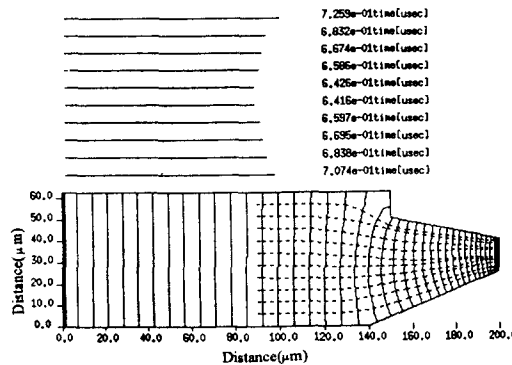


그림 6. Horn read out 구조에서의 등전위 및 주행시간 분포

Fig. 6. Distributions of the equi-potential and transit time in horn read-out geometry.

전계 ($E = 30 V/cm$), 도핑농도 ($5 \times 10^{14} cm^{-3}$), 조성비 ($x = 0.2$), 온도 ($T = 77K$), 이동도 ($\mu_n = 1 \times 10^3$,

$\mu_p = 500 cm^2/V \cdot s$)의 파라미터를 가지고 시뮬레이션한 그림 5와 6은 실선의 등전위 분포와 점선의 전류 흐름 선으로부터 계산한 경로차에 따른 주행시간의 분포를 나타내고 있다. 전계의 왜곡이 시작되는 위치로부터 read-out 영역까지 각각의 전류흐름선을 살펴 볼 때, 먼저 bifurcate 구조를 갖는 그림 5의 경우 전계의 구배에 의해 캐리어의 주행길이가 맨 아래의 전류흐름선에 비해 점점 길어짐에 따라 캐리어의 주행시간 편차가 발생하게 된다. 주행시간 편차 $0.23 \mu sec$ 의한 신호의 퍼짐은 캐리어 이동속도로 $1.44 \times 10^4 (cm/sec)$ 를 가정할 때 일반적으로 예상할 수 있는 확산길이 보다 약 $33 \mu m$ 정도 더 퍼지게 된다. 이렇게 주행시간 편차에 의해 캐리어가 더욱 더 공간적으로 퍼짐에 따라 read-out 영역에서의 샘플링 시간동안 뒤따라오는 화상과의 간섭이 증가하게 되어 화상을 분해하는 능력은 감소되게 된다. 반면, horn 구조의 경우 그림 6의 결과에서 볼 수 있듯이 전계가 소자의 중심을 기준으로 거의 대칭적인 형태를 취하고, 아울러 경로차가 발생하는 read-out 영역에서 전계가 집중되기 때문에 경로차에 따른 주행시간의 편차는 $0.08 \mu sec$ ($11.5 \mu m$)로 줄어들게 된다. 따라서 bifurcate 구조에 비해 보다 나은 해상도를 얻게 된다.

또한, read-out 영역에서의 주행 속도도 공간 분해 성능에 영향을 미치게 되는데 이를 동시에 평가하기 위해 $300K$, $20''$ 의 시계를 갖는 배경으로부터 소자의 read-out 전단에 임의의 화상을 차례로 입사시킨 후 시간에 따른 출력 전압을 조사하였다. 비교 평가를 위해 각각의 read-out 구조에 대해 하나의 신호 펄스만 넣었을 때, 즉 다른 신호에 의해 전혀 영향받지 않을 경우에 얻어진 최대 출력 응답들로 각각 정규화 하였다. 두개의 신호에 의해 생성된 캐리어가 read-out 영역으로 차례로 이동해 옴에 따라 read-out 영역에서의 저항이 변조, 결론적으로 두개의 극대값을 얻게 된다. 실제로 복사에미터스의 양이 동일한 이 두 화상의 완전한 분리는 두 극대 사이의 극소값이 0의 값을 가지고, 출력의 최대값이 일치할 때 얻을 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 horn 구조가 bifurcate 구조에 비해 보다 나은 해상도를 얻게 됨을 그림 7의 출력 응답 특성을 통해 알 수 있다. 이러한 현상은 horn 구조가 read-out 영역에서의 국부적인 전계 집중으로 인해 bifurcate에 비해 보다 빠른 주행속도를 가지고, 아울러 그림 6의 결과에서 확인하였듯이 주행시간의 편차

또한 감소함에 따라 두 화상에 의해 생성된 캐리어가 샘플링 시간동안 read-out 영역에 동시에 존재할 가능성이 bifurcate 구조에 비해 상대적으로 줄어들기 때문이다.

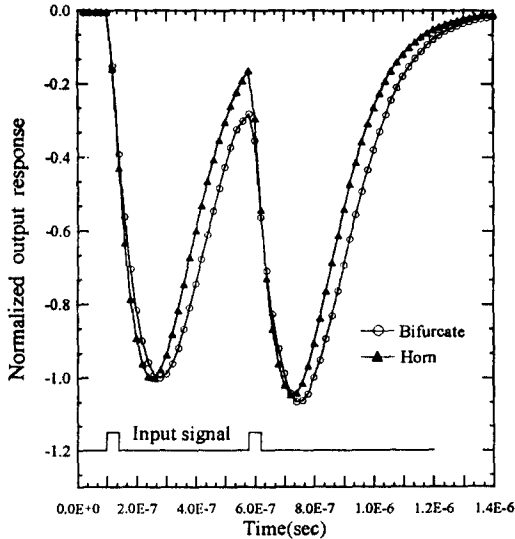


그림 7. Bifurcate와 horn 구조에서의 광 펄스 입사에 의한 출력 특성의 비교

Fig. 7. Comparison of output responses in bifurcate and horn geometries for incident light pulse.

2. 감지성능 평가

적외선 감지기의 성능 지수는 응답도(R), 노이즈(V_n), 감지도(D^*)로 대변되는데, 응답도와 감지도의 정의는 아래와 같다.

$$D^* = D(\lambda, f, \Delta f) = (R / V_n) (A \Delta f)^{1/2} \quad (28)$$

$$R = \frac{V_o}{P_A} \quad (29)$$

여기서 V_o 는 신호 출력전압, V_n 은 Δf 범위에서 측정되는 신호 노이즈 전압, P 는 소자의 영역에 입사되는 광전력(W/cm^2), A 는 감지기의 유효 단면적으로 SPIR 소자의 경우 소자의 폭의 제곱으로 대변된다. 출력전압 V_o 는 read-out 영역을 지나는 캐리어에 의한 저항의 변화에 의해 결정된다.

$$V_o = V_{bias} \frac{\delta R}{R_L} \quad (30)$$

여기서 V_{bias} 는 인가 전압, R_L 은 전체저항, δR 은 read-out 단에서의 저항의 변화를 나타낸다. 소자의

성능을 좌우하는 또 하나의 파라미터인 노이즈의 지배적인 노이즈원은 열 또는 주변 방사에 의해 발생하는 캐리어 농도의 변동으로 인한 생성-재결합($g-r$ noise)이다. 직접 재결합이 지배적인 반도체에서의 노이즈 분광밀도^[19]는 저주파를 가정할 때 다음과 같다.

$$V_n^2 = 4 \left(\frac{kT}{q} \right)^2 \frac{df}{dD} \left\{ \frac{n(L)\beta(L)}{n(L)+\beta(L)} \right\} \left[1 - \frac{\tau}{\tau_r} [1 - \exp(-\tau_r/\tau)] \right] \quad (31)$$

여기서 w , D 는 소자의 폭과 두께, l 은 read-out 영역의 길이, τ 는 캐리어의 평균 수명시간, τ_r 는 read-out 영역에서의 캐리어 주행시간, $n(L)$, $\beta(L)$ 은 각각 read-out 영역에서의 전자 및 정공농도를 나타낸다.

감지성능은 전계, 온도, 배경복사, read-out 구조등 여러가지 조건에 의존하는 함수로 최적의 성능 지수를 얻기 위해선 이러한 조건들에 대한 고려가 선행되어야 할 것이다.

일반적으로 대상으로부터 발산되는 복사에미턴스 신호는 초퍼(chopper)에 의한 주기적인 변조를 통해 암(dark) 상태 및 배경 복사에 의한 성분과 구별하게 되는데, 감지기의 성능 평가를 위해 신호를 주사(scanning) 하지 않고 신호량 500K의 흑체를 가지고 소자 전역에서 캐리어가 충분히 적산될 수 있도록 낮은 주파수로 초핑하여 감지성능을 평가하는 방법^[19]을 일반적으로 이용한다. 따라서, 본 논문에서는 초퍼에 의한 신호의 주기적인 변조를 sine 함수로 기술하고, 배경 복사와 신호 성분을 동시에 입사시켜 얻은 read-out 전위로부터 배경 복사만을 입사시켜서 얻은 read-out 전위와의 차를 통해 신호에 의한 성분만을 검출하는 방법을 사용하여 응답도를 계산하였다. 그림 8, 9, 10에서 사용한 파라미터는 실험치^[19]와의 비교를 위해 소자의 전체 길이는 $1000\mu m$, 폭은 $50\mu m$, read-out 길이는 $65\mu m$, 동작 온도는 $77K$, 과장 대역은 $8-13\mu m$, $N_D - N_A = 5 \times 10^{14} cm^{-3}$ 으로 하였다.

그림 8은 시계 30°인 배경으로부터 500K 흑체 신호에 대한 감지성능을 나타낸 것이다. 전계가 증가함에 따라 캐리어의 재결합 확률은 점차 감소하게 되고, 이에 따라 캐리어의 적산량은 증가하게 되어 보다 큰 출력전압을 얻게 되므로 응답도는 전계에 따라 증가하게 된다. 전계상승에 의해 캐리어의 수명시간이 증가함에 따라 배경에 의해 생성된 캐리어의 농도도 증가하게 되어 노이즈는 대략 전계의 제곱근에 비례하여 증가한

다. 따라서, 응답도와 노이즈의 비로서 결정되는 감지도는 거의 전계의 제곱근에 비례하여 증가하게 된다.

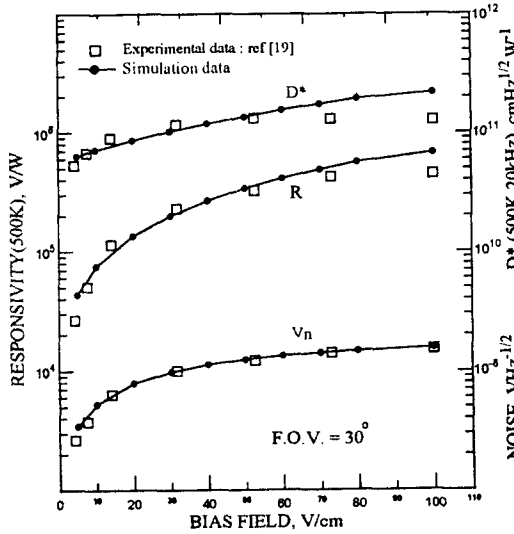


그림 8. 시계 30°에서 인가 전계에 따른 소자의 감지성능
 Fig. 8. Calculated detection performances vs. applied electric field in 30° field-of-view.

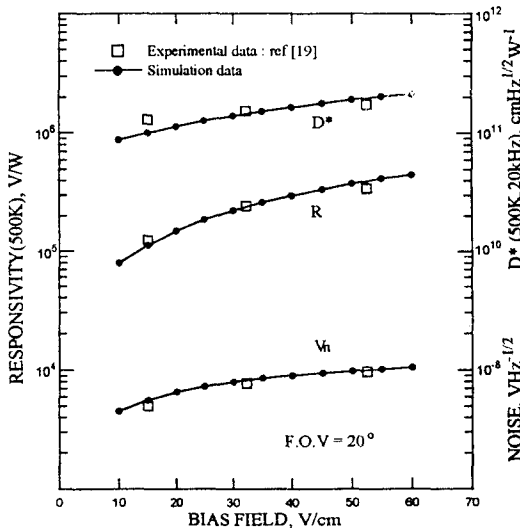


그림 9. 시계 20°에서 인가 전계에 따른 소자의 감지성능
 Fig. 9. Calculated detection performances vs. applied electric field in 20° field-of-view.

실험치의 경우 약 60 V/cm 이상의 전계를 가질 경우 감지도가 떨어지는 것은 Joule 열에 의한 성능 저하로

알려져 있다. 본 논문에서는 아직 열적 효과를 고려하지 않아 높은 전계에서는 실험치와 차이가 나지만 열적 효과가 두드러지지 않는점, 특히 일반적인 동작 영역 (30~50 V/cm)에서는 실험치와 잘 일치하고 있다.

그림 9는 시계 20°인 배경 복사를 갖는 경우로 시계가 좁아짐에 따라 배경복사에 의해 생성되는 캐리어 농도의 감소와 이에 따른 캐리어의 수명시간 증가에 의해 노이즈는 감소하게 되고 응답도는 증가하게 되어 그림 8의 시계 30°의 경우에 비해 보다 나은 감지성능을 얻게된다. 시계 20°의 경우에서도 시뮬레이션 결과와 실험치와 잘 일치하고 있다.

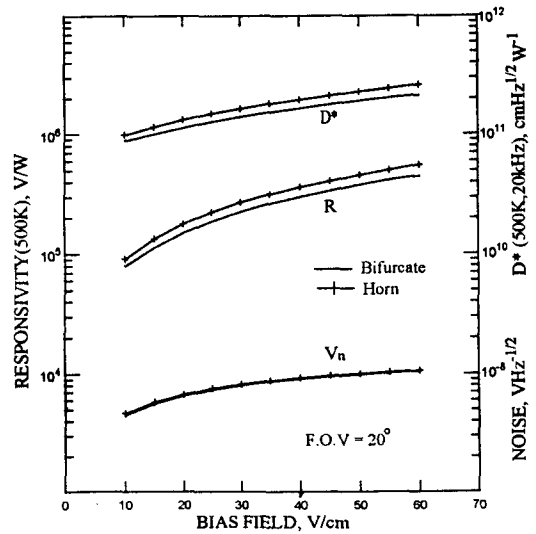


그림 10. 인가 전계에 따른 감지성능의 read-out 구조별 비교
 Fig. 10. Comparison of detection performances as a function of applied electric field vs. read-out geometries.

그림 10은 감지성능을 read-out 구조별로 비교한 것이다. horn 구조의 경우 read-out 영역에서의 국부적인 전계가 bifurcate 구조에 비해 높기 때문에 캐리어의 재결합 확률이 상대적으로 감소하게 되어 보다 높은 응답도를 얻게 된다. read-out 영역에서의 전계의 집중으로 인해 read-out 영역의 캐리어 밀도가 bifurcate 구조에 비해 상대적으로 증가하여 노이즈 진압이 보다 증가하리라 예상되지만, 시뮬레이션 결과 노이즈가 구조에 영향받지 않고 거의 일치하게 나오는 것은 read-out 영역에서의 전계상승에 의해 캐리어

주행속도가 증가되어 캐리어 밀도의 변동 확률이 줄어들기 때문에 노이즈의 증가가 억제되는 것으로 해석된다. 따라서, 전체적인 감지성능은 horn 구조가 보다 우수한 것으로 평가된다.

V. 결 론

자기신호처리 적외선 감지소자의 전기적광학적 특성을 해석하고 전체적인 감지성능을 평가하기 위해 2차원 수치해석 시뮬레이터를 개발하였다. read-out 구조에 구애받지 않는 그리드 생성을 위해 구현한 자동 생성기를 통해 horn 구조와 같이 복잡한 구조에서도 만족 할 만한 결과를 얻었으며, 아울러 newton 방법의 사용으로 보다 빠른 시뮬레이션 속도를 얻게 되었다.

이러한 시뮬레이터를 이용하여 먼저 read-out 구조에 따른 공간해상도 성능을 평가한 결과, horn 구조가 bifurcate 구조에 비해 캐리어 주행시간 차이가 약 3 배 정도 감소하고, 주행속도도 증가하여 보다 나은 공간 해상도를 얻게 됨을 확인하였다. 또한 인가 전계, 배경의 시계, read-out 구조를 변수로 하여 소자의 성능지수인 응답도, 노이즈, 감지도를 계산하였다. 이 결과, 배경의 입사량이 줄어들고 바이어스 전계가 증가함에 따라 응답도와 감지도가 증가하게 됨을 확인하였고, 이는 실험치와도 비교적 잘 일치하였다. 아울러 horn 구조는 read-out 영역의 주행속도 증가에 따른 캐리어 재결합율의 감소로 인해 bifurcate에 비해 보다 높은 응답도와 감지도를 가지게 됨을 확인하였다. 결론적으로 horn 구조가 bifurcate 구조에 비해 보다 나은 공간해상도 및 감지성능을 가지게 된다는 사실을 제시하였다. 이상의 결과들을 통해 동작조건이나 기하학적 구조에 구애받지 않는 본 시뮬레이터의 능력을 확인하였다. 따라서, 이는 소자의 특성해석 뿐만 아니라 최적 화에도 유용하리라 기대된다.

차후 과제로 신호 주사에 따른 캐리어의 적산 및 제한성, 캐리어의 이동속도와 화상의 주사속도간의 속도 부정합에 따른 영향, 열적인 효과에 의한 소자의 특성 변화 등에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Blackburn, M. V. Blackman, D. E. Charlton, W. A. Dunn, M. D. Jenner, J. Oliver, and J. T. M. Wotherspoon, "The Practical Realization and Performance of SPRITE Detector," *Infrared Physics*, Vol. 22, pp. 57-64, 1982.

[2] C. T. Elliott, "Cadmium Mercury Telluride Infrared Detectors," *J. of Crystal Growth*, Vol. 72, pp. 453-461, 1985.

[3] Xin Zhjun, and Feng Wenqing, "Optimization of SPRITE Detectors," *Infrared Physics*, Vol. 30, pp. 489-497, 1990.

[4] Siegfried Selberherr, *Analysis and Simulation of Semiconductor Devices*, ch.2.4.7, Springer-Verlag., 1984.

[5] S. H. Lo, "A New Mesh Generation Scheme for Arbitrary planar domains," *Int J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 21, pp.1403-1426, 1985.

[6] E. A. Sadek, "A Scheme for the Automatic generation of Triangular Finite elements," *Int J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 15, pp. 1813-1822, 1980.

[7] W. M. Coughran, M. R. Pinto, and P. K. Smith, "Adaptive Grid Generation for VLSI Device Simulation," *IEEE Trans. C.A.D.*, Vol. 10, no. 10, pp. 1259-1275, 1991.

[8] M. R. Pinto, *Comprehensive Semiconductor Device Simulation for Silicon VLSI*, Ph. D. Thesis, Stanford University., 1990.

[9] C. H. Price, *Two-Dimensional Numerical Simulation of Semiconductor Devices*, Ph. D. Thesis, Stanford University., 1982.

[10] D. L. Scharfetter and H. K. Gummel, "Large-Signal Analysis of a Silicon Read Diode Oscillator," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. ED-16, pp. 64-77, 1969.

[11] S. C. Eisenstat, M. C. Gursky, M. H. Schultz, and A. H. Sherman, "Yale Sparse Matrix Package," *Int J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 18, pp. 1145-1151, 1982.

[12] S. C. Chapra and R. P. Canale,

- Numerical Methods for Engineers*. ch.9, McGraw-Hill press., 1990.
- [13] W. M. Higgins, G. N. Pultz, R. G. Roy, R. A. Lancaster, and J. L. Smith, "Standard Relationships in the properties of Hg_{1-x}Cd_xTe." *J. Vac. Sci. Tech.*, A 7(2), pp. 271-275, 1989.
- [14] 광계달 외, "HgCdTe 적외선 감지 소자의 Numerical Simulator 개발에 관한 연구 (Ⅲ)," 국방과학연구소 연구보고서., 1992
- [15] C. J. Summers, B. Darling, and B. G. Martin, "Computer Modeling of carrier transport in(Hg,Cd)Te photodiodes." *J. Appl. Phys.*, Vol 59. no. 7, pp. 2457-2466, 1986.
- [16] C. A. Hougen, "Model for Infrared Absorption and Transmission of Liquid Phase Epitaxy HgCdTe," *J. Appl. Phys.*, Vol. 66, pp. 3763-3766, 1989.
- [17] E. Finkman and S. E. Schaman, "The Exponential Optical Absorption Band tail of HgCdTe," *J. Appl. Phys.*, Vol. 66, pp. 2986-2990, 1984.
- [18] T. N. Casselman and P. E. Peterson, "A Comparison of the Dominant Auger Transition in p-type (Hg,Cd)Te," *Solid State Com.*, Vol. 33, pp. 615-619, 1979.
- [19] C. T. Elliott, D. Day, and D. J. Wilson, "An Integrating Detector for Serial Scan Thermal Imaging," *Infrared Physics.*, Vol. 22, pp. 31-42, 1982.

 저 자 소 개

趙南洪 (正會員) 第 31卷 A編 第 1號 參照
 현재 한양대학교 전자공학과 박사과정

郭桂達 (正會員) 第 27卷 第 7號 參照
 현재 한양대학교 전자공학과 교수