

페이즈 필드법을 이용한 박막형 태양전지의 광포획층 설계[§]

허 남 준* · 유 정 훈**

* 연세대학교 기계공학부

Design of Light Trapping System of Thin Film Solar Cell Using Phase Field Method

Namjoon Heo* and Jeonghoon Yoo**

* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received April 30, 2014 ; Revised July 7, 2014 ; Accepted July 9, 2014)

Key Words: Light Trapping(광포획), Thin Film Solar Cell(박막형 태양전지), Infrared Stealth(적외선 피탐지), Phase Field Method(페이즈 필드법), Topology Optimization(위상최적설계)

초록: 본 연구는 페이즈 필드법 기반으로 하는 위상최적화를 이용하여 박막형 태양 전지의 광포획 구조의 반사층 설계를 목표를 하였다. 이를 위하여 입사된 빛이 설계영역인 반사층에서 반사되어 원하는 방향으로 진행하도록 하고자 하였다. 또한 같은 방법을 근적외선 영역의 반사판의 설계에 적용한 적외선 피탐지 구조의 개념 설계를 수행하였으며, 페이즈 필드법 기반의 결과와 밀도법 기반의 결과를 비교하였다. 목적함수는 에너지의 흐름을 나타내는 포인팅 벡터값의 최대화로 설정하였고, 반사된 빛의 방향을 조절하기 위하여 지정된 측정영역에서 값을 측정하였다. 본 연구의 유한요소해석 및 최적화 과정은 상용 프로그램인 COMSOL과 Matlab 프로그램을 이용하여 수행되었다.

Abstract: This study focused on the design of the reflecting layer of a light trapping system for a thin film solar cell using topology optimization based on the phase field method. Therefore, incident light was caused to propagate in the desired direction by reflecting it from this layer, which is the design domain. The same method was applied to the conceptual design of an infrared stealth structure in near infrared range. The results using the phase field method were compared with those using the density method. The design objective was to maximize the Poynting vector value representing the energy flux, which was measured in a measuring domain to control the reflected wave direction. A finite element analysis and optimization process were performed using the commercial package COMSOL combined with the MATLAB programming.

1. 서 론

박막형 태양전지는 보통 유리 기판이나 금속 박판 위에 소재들을 반도체 제조 기술을 사용하여 박막 형태로 증착함으로써 원재료의 사용량이 획기적으로 줄어들고 단일 장소에서 모든 공정을 마칠 수 있어 웨이퍼 형태의 벌크형 실리콘 태양 전지에 비해 생산 비용 절감의 효과가 매우 큰 장점이 있다. 그러나 실리콘 기반의 박막형 태양전지는 벌크형 실리콘 태양 전지에 비하여 상대적으로

낮은 에너지 전환효율을 가지는 단점을 가진다.

박막형 태양 전지의 효율 증대를 위하여 광포획층을 사용할 수 있으며, 이는 태양전지의 흡수층과 투명전도층 사이의 반사층에 표면 텍스처링(surface texturing)을 도입하여 현실화시킬 수 있다.⁽¹⁾ 일반적으로 표면 텍스처링을 통하여 반사층 표면에 피라미드 형태의 구조를 생성하고, 이를 통해 태양전지 내부로 입사되는 빛을 전반사(total reflection)시켜 흡수층 내부에 빛을 가두는 것이 광포획의 핵심 개념이다. Soh 등⁽²⁾은 반사층에 밀도법 기반의 위상최적설계(topology optimization) 방법을 통하여 텍스처링 구조를 설계하였으며 이를 통하여 입사된 빛의 광학적 경로를 증가시킴으로써, 태양 전지의 에너지 전환 효율을 증가시키는 연구를 진행하였다.

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 CAE 및 응용역학부문 춘계학술대회(2014. 4. 30.-5. 3., 서귀포 KAL 호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, yoojh@yonsei.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

적외선 피탐지 기술 또한 최근 전장 환경의 기술 발달에 따라 무엇보다 중요한 화두가 되었다. 전장의 환경은 초기 우위를 점하기 위하여 광범위하게 해·공군력을 투사하는 방식으로 변화하고 있으며, 다양한 군사적 임무의 수행을 위해서는 군용 함정 및 항공기의 생존성 향상이 무엇보다 중요하다.⁽³⁾ 그러나, 항공기나 함정으로부터의 방출되는 적외선은 탐지 및 추적 등에 이용될 수 있으며, 특히 엔진에서의 열원과 엔진 배기가스 및 태양광 반사(solar reflection) 등은 적외선 방출의 주요한 요인이 된다. 그러므로 탐지의 가능성을 줄이기 위해서는 항공기로부터 방사되는 적외선 신호를 감소시키기 위한 스텔스(stealth) 기술이 필수적이며, 현재 이에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다.^(3,4)

본 연구에서는 광포획 효과를 통한 박막형 태양 전지의 에너지 전환 효율을 증가 시키기 위하여 페이즈 필드법(phase field method)에 기반한 위상 최적설계 방법을 도입하였다. 이를 통하여 기존의 밀도법 기반의 기존 연구⁽²⁾에 비해 보다 단순한 형상의 광포획층 설계를 수행하였다. 또한 적외선 피탐지를 위한 구조 설계의 개념으로써, 동일한 설계 방법론의 적용을 통하여 입사되는 적외선 빔을 특정 방향으로 꺾이게 함으로써 피탐지 효과를 달성하기 위한 연구 결과를 제시하였다. 본 연구의 해석은 상용패키지 COMSOL의 radio frequency (RF) module 과 partial differential equation(PDE) module 을 사용하여 수행되었다.

2. 설계 문제의 정의

2.1 설계 개요

위상최적설계는 정해진 설계 영역을 여러 개의 요소로 이산화하여 목적함수와 제한 조건을 만족하는 최적의 물질 분포를 찾는 구조 설계 기법중의 하나이다.⁽⁵⁾ 위상최적화의 과정에서는 설계변수의 변화에 따른 목적함수와 제한조건의 변화를 찾기 위한 민감도 계산이 필수적이며, 이러한 과정의 반복을 통하여 초기 형상으로부터 최종적인 최적 형상 분포를 찾아가게 된다. 특히 최근 위상최적설계의 적용 범위는 On/Off 방법을 적용하여 고주파수(high frequency) 대역의 전자기장 내 구조물의 설계 영역까지 확장되고 있는 등 다양한 분야의 설계에 적용 가능한 장점을 지니고 있다.^(6,7)

본 연구의 설계 개념을 Fig. 1에 나타내었다. 입사된 다양한 주파수 대역의 입사광은 반사층에서 반사되어 특정한 방향으로 진행하게 된다. 이 때, 반사층 부분의 유전체층(dielectric layer)의 구조 설계를 통하

여 반사되는 빔의 방향을 적절히 조절함으로써 가시광선 대역에서는 태양전지 내부의 광포획 효과를 얻을 수 있다. 이를 통하여 태양전지 내부의 총 에너지량을 증가시킬 수 있으며, 박막형 태양 전지의 에너지 전환 효율 증가를 기대할 수 있다. 이러한 반사되는 빛의 방향을 조절하는 개념은 적외선 피탐지 구조에도 적용이 가능하며, 이는 방사형으로 방출되는 적외선을 내부의 반사층과 같은 구조물의 적절한 설계를 통해 일정한 방향으로 모아 방출시키는 방식으로 적외선 피탐지 구조에 응용될 수 있다.

2.2 해석 모델

본 연구에서 사용된 해석 모델은 Fig. 2에 나타내었으며, 설계영역(design domain)과 측정영역(measuring domain)을 함께 표시하였다. 설계영역의 크기는 폭 2.4 μm , 높이 0.15 μm 의 사각형 부분으로 정의하였고 이는 2400x150의 요소로 구성된다. 각 부분의 소재로는 투명 전도층(transparent conductive layer)에 Zinc Oxide, 흡수층에는 amorphous silicon (a-Si)이 사용되었으며 금속 박막에는 은(silver, Ag)가 각각 사용되었다.

입사된 빛은 Transverse Magnetic (TM) 모드로 편광되며, 5도의 입사각을 가진다. 목적함수의 측정영역은 세 부분으로 나누어, 반사되는 빛의 방향을 조절하고자 하였다. 측정 영역에서의 측정값으로는 에너지의 흐름을 나타내는 포인팅 벡터값을 선정하였다.

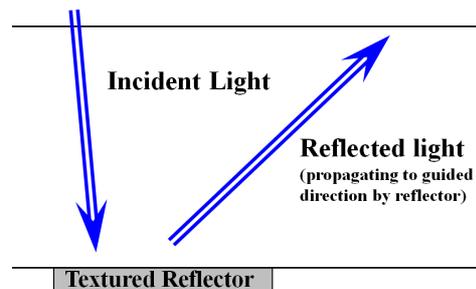


Fig. 1 Design concept of the reflecting layer

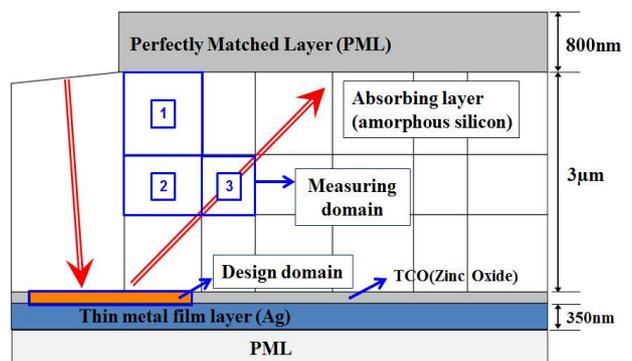


Fig. 2 Schematic modeling for analysis and design of the reflecting layer

3. 설계 이론

3.1 지배방정식

본 연구의 대상이 되는 시스템은 가시광선 대역의 장파장 대역인 800 nm와 적외선 대역의 1064 nm의 두 파장에서의 해석을 고려한다. 각 재료의 굴절률(refractive index)은 Table 1에 표기하였다. 해석을 위한 지배방정식은 다음과 같이 TM 모드에 대한 Maxwell 방정식을 도입하였다.

$$\nabla \cdot \frac{1}{\epsilon_r} \nabla \mathbf{H} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{H} 는 자기장도, ϵ_r 는 상대 유전율(relative electric permittivity), c_0 는 공기 중의 빛의 속도를 나타낸다.

세부적인 모델링은 Fig. 2에 나타낸 바와 같고, 좌측 상단의 경계로부터 입사된 빛은 설계 영역인 반사층에서 반사되어 3번 측정영역 부분으로 진행되도록 최적화를 진행하였다. 해석 모델의 입사 경계면을 제외한 나머지 부분의 열린 경계에서의 파의 재반사를 방지하기 위해 perfectly matched layer(PML) 영역을 도입하였다. 입사 면에서의 빛의 입사를 위한 경계조건과 PML 영역에서의 파의 감쇠를 위한 지배방정식은 각각 다음의 식 (2), (3)과 같다.

$$\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} + \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} = i\omega^2 \sqrt{\frac{1}{c^2 \epsilon_r}} (\mathbf{H} - \mathbf{H}_0) \quad (2)$$

$$\frac{1}{S_x^2} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial x} \right) + \frac{1}{S_y^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial y} \right) = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} \quad (3)$$

이 때, ω 는 진동수를 나타내고, S_x 와 S_y 는 각각 x 및 y 축 방향으로의 PML 계수를 나타낸다.⁽⁸⁾

전술된 지배방정식에 의한 초기 모델(prototype)의 유한요소 해석에 따른 자기장의 분포가 Fig. 3(a)에 나타나있다. Fig. 3(b)에 검정색으로 표시되어 있는 ZnO로만 이루어진 초기 모델에서는 반사파가 원하는 방향으로 진행하지 못하고 입사된 경계 방향이나 Fig. 2의 1번이나 2번 측정영역으로 더 많이 전파되고 있는 모습을 확인할 수 있다.

3.2 페이즈 필드법 기반의 최적설계

페이즈 필드법은 두 가지 이상의 상(phase)이 존재하는 영역에서 가상의 경계 에너지를 통해 서로 다른 상 사이의 경계의 변화를 표현하는 방법이다. 가상의 경계에너지는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\int_{\Omega_2} \frac{1}{2} \tau |\nabla \phi|^2 d\Omega \quad (4)$$

Table 1 Refractive index of each material at different wavelengths

Material	Wavelength	Refractive index
Zinc oxide(ZnO)	800 nm	1.959
	1064 nm	1.940
Amorphous silicon(a-Si)	800 nm	3.651+ 0.0056i
	1064 nm	3.59681
Silver (Ag)	800 nm	0.1439+ 5.289i
	1064 nm	0.2342+7.214i

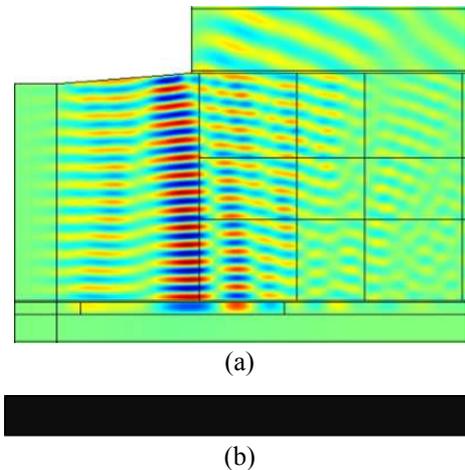


Fig. 3 Analysis result of prototype; (a) magnetic field contour plot and (b) material distribution of the prototype model in the design domain filled with ZnO

여기서, τ 와 ϕ 는 확산 계수(diffusion coefficient)와 페이즈 필드 파라미터를 의미한다.

본 연구에서는 double well potential (DWP) 함수가 결합된 형태의 페이즈 필드 방법^(8,9)을 사용하였으며, 이를 통하여 상의 변화가 경계에서만 이루어지도록 하였다. 그러므로 설계 영역 전체에서 상 변화가 이루어지지 않으므로, 초기 형상이 주어질 때 형상의 경계 부분부터 형상의 변화가 시작되게 된다.

3.3 설계 문제의 정의

본 연구에서는 반사된 빛이 Fig. 2의 3번 측정영역으로 진행하도록 하였다. 이를 위하여 1번과 2번 측정영역에서의 포인팅 벡터값을 최소화하고 3번 영역에서의 포인팅 벡터값을 최대화하는 것으로 설계의 목적함수를 설정하였으며, 이는 1, 2번 영역에서의 측정 값의 합에서 3번 영역의 측정 값을 빼는 형태로써 최적 설계 문제를 다음과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \mathbf{P}_{total}(\phi) = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_3 \\ \text{Subject to } & 0 \leq \phi \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

이 때, 각 영역에서의 포인팅 벡터값은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{P} = \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) = \text{Re} \left(-\frac{\mathbf{H}_z^*}{j\omega\epsilon} \left(\frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial \mathbf{H}_z}{\partial y} \hat{j} \right) \right) \quad (6)$$

여기서 \mathbf{H}^* 는 \mathbf{H} 의 복소공액(complex conjugate)를 나타내고, \mathbf{E} 는 전기장 세기(electric field strength)를 의미한다.

설계 영역에 분포되는 재료의 물성치는 Table 1에 제시된 굴절률 값을 이용하여 다음과 같이 정의된다.

$$n = n_{ZnO} + \phi(n_{a-Si} - n_{ZnO}) + i(k_{ZnO} + \phi(k_{a-Si} - k_{ZnO})) \quad (7)$$

굴절률은 지배방정식에 사용되는 상대 유전율과 다음의 식 (8)의 관계를 가진다.

$$n^2 = \epsilon_r = \epsilon_r' + i \cdot \epsilon_r'' \quad (8)$$

이 때, ϵ_r' 과 ϵ_r'' 은 각각 상대 유전율의 실수부와 허수부를 나타낸다.

4. 설계 결과

구조물 설계의 결과는 800 nm 및 1064 nm 파장의 입사파에 대하여 페이즈 필드법 기반과 밀도법 기반의 결과를 비교하였다. 이 경우 페이즈 필드법 기반의 결과는 확산 계수의 변화에 따라 구조물의 복잡도를 조절할 수 있으므로,^(10,11) 확산 계수 값의 변화에 따른 최종 목적함수 값과 얻어진 설계영역의 최종형상을 비교함으로써 최적의 확산 계수 값을 선정하고자 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 DWP 기반의 페이즈 필드법^(8,9)을 사용하므로, Fig. 4(a)와 같은 내부에 구멍이 존재하는 초기 모델로부터 최적화를 시작하였다. 총 설계 반복(iteration)의 횟수는 페이즈 필드법을 사용한 경우 800 nm에서 1500번과 1064 nm에서는 2500번, 밀도법의 경우 300번을 기준으로 하였다.

결과값의 비교는 Fig. 3(b)의 초기 모델의 Poynting vector 값을 기준으로 정규화(normalized)한 값을 도출하여 진행하였으며,⁽⁶⁾ 목적함수의 값과 수렴도 및 회색 밀도(gray scale)의 영향을 고려하여 최종적인 최적 모델을 선정하였다.

4.1 800 nm에서의 해석 결과

800 nm에서의 페이즈 필드법 기반의 결과는 Table 2에 표시되어 있으며, 확산 계수 값에 따른

최종 형상 변화와 밀도법 기반에서의 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 이 때, 검정색 영역은 ZnO, 하얀색 영역은 a-Si 부분을 의미한다.

Table 2는 각 측정영역에서의 정규화된 Poynting vector 값의 결과를 나타내고 있으며, 이로부터 확산 계수의 값이 1.0×10^{-3} 인 결과로부터 밀도법 기반의 결과까지 정규화된 목적함수의 값은 각각 -11.00, -12.82, -11.28, -9.54와 -17.87을 가지게 된다. 그러나 Fig. 4에 나타낸 각 경우의 최적화된 최종 형상을 비교할 때, Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)는 회색 밀도 부분이 많이 나타남을 확인할 수 있고, 밀도법 기반의 Fig. 4(f)의 결과 또한 너무 복잡한 형상이 나타남을 알 수 있다. 그러므로 800 nm 기반의 해석에서는 확산 계수가 1.0×10^{-5} 일 때의 형상인 Fig. 4(d)의 결과를 최적화의 최종 현상으로 선정하였으며, 이에 대한 반사파의 분포 형상을 Fig. 5(a)에 나타내었다. 또한 설계과정에서의 목적함수 값의 변화를 Fig. 5(b)에 도시하였다.

4.2 1064nm에서의 해석 결과

입사빔의 파장을 1064 nm로 바꾸고 위의 Fig. 2

Table 2 Normalized Poynting vector values at each measuring region of each of design cases for incident beam wavelength of 800 nm

case	Region 1	Region 2	Region 3
1.0×10^{-3}	0.05	0.37	11.43
1.0×10^{-4}	0.04	0.44	13.30
1.0×10^{-5}	0.03	0.39	11.71
1.0×10^{-6}	0.03	0.43	10.00
density	0.06	0.90	18.83

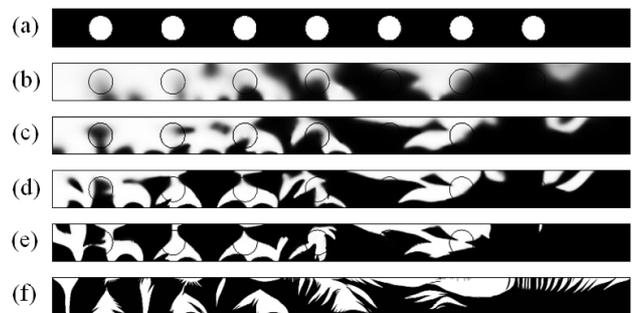


Fig. 4 Design shapes for 800 nm incident beam wavelength; (a) initial design, results with (b) diffusion coefficient of 1.0×10^{-3} , (c) diffusion coefficient of 1.0×10^{-4} , (d) diffusion coefficient of 1.0×10^{-5} , (e) diffusion coefficient of 1.0×10^{-6} and (f) result of density method

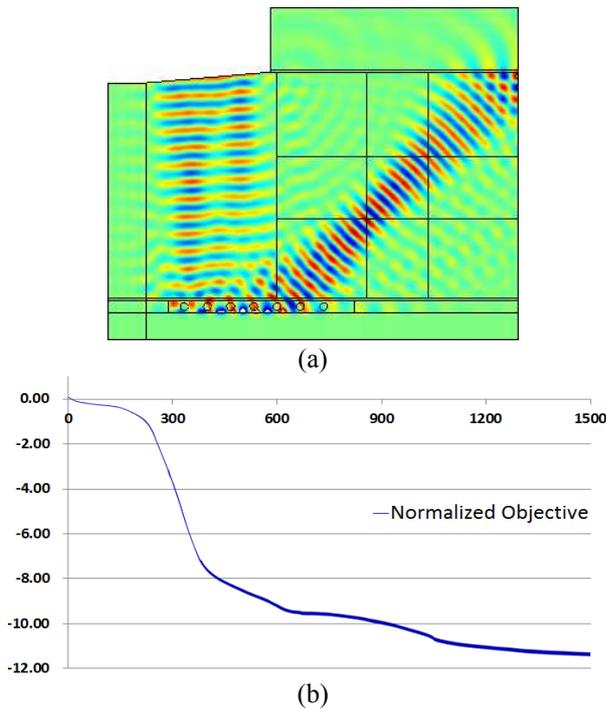


Fig. 5 The phase field method based design result with the diffusion coefficient of 1.0×10^{-5} for incident beam wavelength of 800 nm; (a) magnetic field contour plot and (b) convergence history during the design process

와 같은 개념의 설계를 수행하여 적외선 영역에서의 스텔스 효과를 얻는 구조를 도출하였다. 앞 절의 경우에서와 같이 서로 다른 확산 계수를 가진 페이지 필드법 기반의 설계 결과와 밀도법 기반의 설계에 따른 각 측정 영역에서의 정규화된 Poynting 벡터 값을 Table 3에 나타내었다. 이에 따른 정규화된 목적 함수의 값은 확산 계수의 값이 1.0×10^{-3} 인 결과로부터 밀도법 기반의 결과까지 각각 -88.51, -125.20, -157.26, -105.00, -68.59를 가짐을 식 (5)로부터 계산할 수 있다.

Fig. 6은 설계를 위한 초기 형상과 Table 3의 각 경우의 반사층의 형상을 보여주고 있다. Fig. 5에서 나타낸 형상을 비교하면, 확산 계수 1.0×10^{-3} 과 1.0×10^{-4} 에서의 결과는 회색 밀도 부분이 많고, 밀도법 기반의 결과는 깃털의 경계 형상과 같은 복잡한 형상이 나타나므로 본 연구에서 추구하는 나노 단위의 구조물에는 적절하지 않다. 따라서 본 연구에서는 확산 계수가 1.0×10^{-5} 의 결과를 최적 결과로 선정하였다. Fig. 6의 형상은 Fig. 4의 결과와 유사한 형상을 보이나 입사빔의 파장 증가에 따라 전체적인 구조물 크기의 증가를 확인할 수 있다. Fig. 7(a)는 제시된 최적 구조에서의 반사파의 분포 형상을 나타내고 있으며, Fig. 7(b)는 목적함수

Table 3 Normalized Poynting vector at each measuring region of each analysis case based on 1064 nm

case	Region 1	Region 2	Region 3
1.0×10^{-3}	2.77	12.62	103.91
1.0×10^{-4}	3.52	14.84	143.56
1.0×10^{-5}	3.92	14.37	157.26
1.0×10^{-6}	2.91	8.92	116.82
density	1.08	6.29	75.96

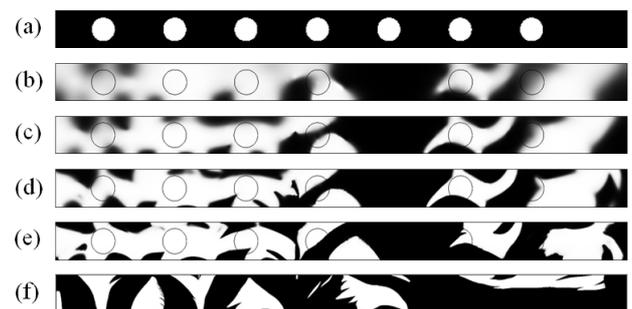


Fig. 6 Design shapes for 1064 nm incident beam wavelength; (a) initial design, results with (b) diffusion coefficient of 1.0×10^{-3} , (c) diffusion coefficient of 1.0×10^{-4} , (d) diffusion coefficient of 1.0×10^{-5} , (e) diffusion coefficient of 1.0×10^{-5} and (f) result of density method

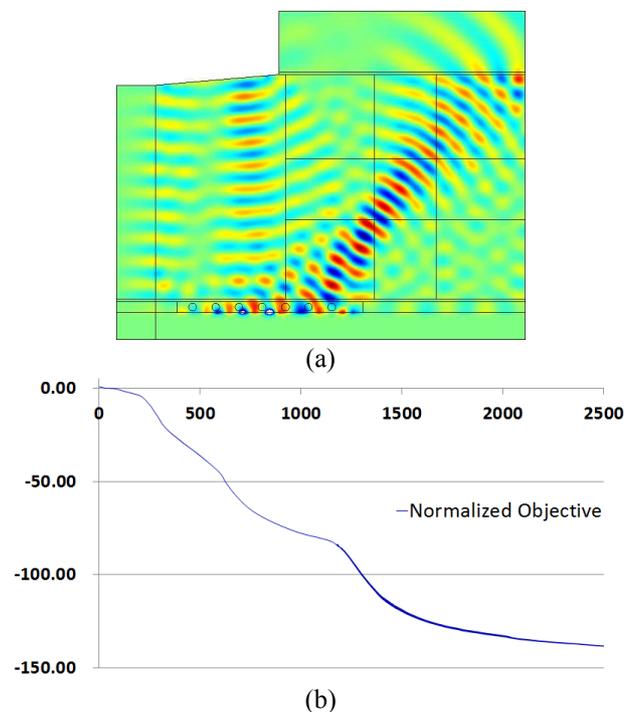


Fig. 7 The phase field method based design result with the diffusion coefficient of 1.0×10^{-5} for incident beam wavelength of 1064 nm; (a) magnetic field contour plot and (b) convergence history during the design process

값의 변화 이력을 보여주고 있으며, Fig. 5(b)의 결과와 비교할 때 수렴까지 더 많은 반복과정이 필요함을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 박막형 태양전지에서의 광포획 효과의 증가를 위한 반사층 설계를 진행하였으며, 같은 설계 개념을 적외선 피탐지 구조를 위한 구조 설계에 적용하였다. 태양전지의 반사층 설계를 위해서는 800 nm 파장의 빛을 입사조건으로 사용하였고, 적외선 피탐지 구조의 설계에는 1064 nm의 근적외선 영역의 입사광을 대상으로 하였다.

제시된 페이즈 필드법 기반의 구조설계 방법을 이용하여 새롭게 설계된 반사층은 밀도법 기반의 결과에 비하여 단순한 결과의 형상을 도출할 수 있었으며, 확산 계수의 변화에 따라 다른 결과 형상을 얻을 수 있었다. 각 경우에 있어 확산 계수가 1.0×10^{-5} 인 경우의 결과를 최적 모델로 선정하였으며, 입사광이 800 nm일 때의 결과는 반사된 빛을 진행시키고자 한 방향인 3번째 측정영역을 기준으로 초기 모델 대비 11.71배의 증가된 Poynting vector값을 보였다. 또한 근적외선 영역인 1064 nm의 입사광 조건에서는 157.26배의 성능 향상을 보여주고 있다.

본 연구의 결과를 통하여 페이즈 필드법 기반의 구조설계 방법이 가시광선영역의 나노 구조물의 설계 및 근적외선영역의 구조물 설계에도 유용하게 적용이 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업과 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0017512).

참고문헌 (References)

(1) Müller, J., Rech, B., Springer, J. and Vanecek, M.,

2004, "TCO and Light Trapping in Silicon Thin Film Solar cells," *Solar Energy*, Vol. 77, pp. 917~930.

(2) Soh, H. J. and Yoo, J., 2012, "Texturing Design for Light Trapping System Using Topology Optimization," *IEEE Transactions on Magnetics.*, Vol. 48, No.2, pp. 227~230.

(3) Ball, R. E., 2003, *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, AIAA Education Series, 2nd Edition, Blacksburg.

(4) Mahulikar, S. P., Sonawane, H.R. and Kolhe, P.S., 2007, "Infrared Signature Studies of Aerospace Vehicles," *Progress in Aerospace Science*, Vol. 43, pp. 218-245.

(5) Bendsoe, M. P. and Sigmund, O., 2003, *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*, Springer-Verlag, Berlin.

(6) Song, S. M. and Yoo, J., 2012, "Nano-Aperture Grating Structure Design in Ultra-High Frequency Range Based on the GA and the ON/OFF Method," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36, No. 7, pp. 739~744.

(7) Shin, H. D. and Yoo, J., 2013, "Nanoaperture Design in Visible Frequency Range Using Genetic Algorithm and ON/OFF Method Based Topology Optimization Scheme," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 37, No. 12, pp. 1513~1519.

(8) Lim, H., Yoo, J. and Choi, J. S., 2014, "Topological Nano-Aperture Configuration by Structural Optimization Based on the Phase Field Method," *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 49, pp.209~224.

(9) Takezawa, A., Nishiwaki, S. and Kitamura, M., 2010, "Shape and Topology Optimization Based on the Phase Field Method and Sensitivity Analysis," *J. Comput. Phys.*, Vol. 229, pp. 2697~2718.

(10) Yamada, T., Izui, K. Nishiwaki, S. and Takezawa, A., 2010, "A Topology Optimization Method Based on the Level Set Method Incorporating a Fictitious Interface Energy," *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 199, pp. 2876~2891.

(11) Yamada, T., Izui, K. and Nishiwaki, S., 2011, "A Level Set-Based Topology Optimization Method for Maximizing Thermal Diffusivity in Problems Including Design-Dependent Effect," *J. Mech. Design*, Vol.133(3), p. 031011.