유한차분 시간영역 방법을 이용한 Ag 나노링 구조의 산란효과

이태수* · 정종율*,**†

*충남대학교 녹색에너지기술전문대학원, **충남대학교 재료공학과

Finite-Difference Time-Domain Calculation of Light Scattering Efficiency for Ag Nanorings

Tae-Soo Lee* and Jong-Ryul Jeong*,**†

*Graduate School of Green Energy Technology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Department of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(2012년 8월 17일 접수 : 2012년 9월 17일 최종수정 : 2012년 9월 17일 채택)

Abstract Enhancement of light trapping in solar cells is becoming increasingly urgent for the development of next generation thin film solar cells. One of the possible candidates for increasing light trapping in thin film solar cells that has emerged recently is the use of scattering from metallic nanostructures. In this study, we have investigated the effects of the geometric parameters of Ag nanorings on the light scattering efficiency by using three dimensional Finite Different Time Domain (FDTD) calculations. We have found that the forward scattering of incident radiation from Ag nanorings strongly depends on the geometric parameters of the nanostructures such as diameter, height, etc. The forward scattering to substrate direction is increased as the outer diameter and height of the nanorings decrease. In particular, for nanorings larger than 200 nm, the inner diameter of Ag nanorings should be optimized to enhance the forward scattering efficiency. Light absorption and scattering efficiency calculations for the various nanoring arrays revealed that the periodicity of nanorings arrays also plays an important role in the absorption and the scattering efficiency enhancement. Light scattering efficiency calculations for nanoring arrays also revealed that enhancement of scattering efficiency could be utilized to enhance the light absorption through the forward scattering mechanism.

Key words metallic nanostructures, light scattering, FDTD, LSPR.

1. 서 론

물질이 나노 크기가 되면 bulk 상태와 다른 새로운 성질을 나타내게 되는데, 이 나노구조체는 크기와 조성 및 형태의 조절을 통해 물질의 광학적, 전기적, 자기적, 화학적 특성을 변화시킬 수 있으며, 이러한 특성들을 이용하여 다양한 분야에서 활용이 되고 있다. 특히, 최근에는 가시광 영역에서 음의 유전상수를 가지는 Au, Ag와 같은 귀금속 소재 기반의 나노 구조체에서 나타나는 국부 표면 플라즈몬 공명(localized surface plasmon resonance, LSPR) 현상을 이용하는 플라즈모닉(plasmonic) 금속 나노 구조체가 광전자소자, 바이오센서, 광학, 촉매 분야 등 다양한 분야에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 플라즈몬 공명 현상 중 하나인 LSPR 현상은 금속 나노 구조체의 자유 전자가 입사하는 빛에 의해서 집단적인 진동

현상을 일으키는 것으로, 이러한 전자의 공명 현상으로 인해 금속 나노 구조체 주위에서 전자기장이 증폭되는 현상이 발생하게 된다. 증폭된 전자기장은 소재의 광학적, 전기적, 또는 촉매적 특성에 많은 영향을 미치게 되며, 이러한 특성을 이용하기 위하여 금속 나노 구조체의 크기나 모양에 따른 금속 나노 구조체의 플라즈몬 특성에 대한 연구가 광범위하게 진행되고 있다.¹⁻⁴⁾

플라즈몬 특성을 이용한 다양한 연구 분야 가운데 태양전지 분야에서 이러한 금속 나노구조체의 광학적 특성을 이용하여 효율을 높이기 위한 연구도 활발히 진행 중에 있다. 플라즈모닉 금속 나노구조체는 태양전지 분야에서 금속 나노 구조체 주위의 전자기장의 진행 방향을 조절하는 웨이브 가이드(waveguide) 역할을 하거나, 전자기장을 증폭시키는 안테나(antenna) 역할을 하는 것으로 보고되고 있다. 박막태양전지의 경우 박막의 두께에 의한 약한 흡수율 때문에 효과적인 light trapping이 고효율을 달성하기 위해 요구되고 있으며, 이러한 박막 태양전지의 흡수율을 향상시키기 위한 방법으로 투명전

†Corresponding author

E-Mail : jrjeong@cnu.ac.kr (J. -R. Jeong)

도막의 표면형상 방법⁵⁾과 앞에서 언급한 금속 나노 구조체의 LSPR 현상을 이용한 입사된 빛을 효과적으로 trapping 하는 연구가 진행 중이다.⁶⁾ 실제로 비정질 실리콘 박막태양전지, 유기 태양전지, 염료감응형 태양전지 등에서 Ag 나노 입자를 이용하여 태양전지의 광전류 및 효율이 향상되었다는 연구가 보고 되고 있다.⁷⁻¹⁵⁾ 이와 같이 최근에 이론 및 시뮬레이션을 이용한 계산을 통해 금속 나노 구조체가 태양전지 소자에서 light trapping 효율에 중요한 영향을 미치는 것이 밝혀졌으나, 지금까지 보고된 금속 나노 구조체의 경우 cylinder, sphere 등 비교적 간단한 구조에 국한되어 있는 실정이다.¹⁶⁾ 따라서 나노 구조체를 이용한 초고효율 태양전지 개발을 위해서는 다양한 형태의 나노 구조체가 태양전지 및 광전자 소자의 특성에 미치는 영향에 대한 연구가 요구되고 있다. 최근 본 연구실에서는 저가의 임프린트 공정을 활용하여 나노링(nanoring) 구조를 형성하고, 나노링 구조에 의한 자기적, 광학적 특성의 변화를 보고한 바 있으며, 일부 그룹에서 나노링 구조에서 나타나는 흥미로운 공명 현상을 바이오센서, 자성메모리, 메타물질 분야에 적용할 수 있음을 보고한바 있다.¹⁷⁻¹⁸⁾ 본 연구에서는 나노링 구조에서 나타나는 공명 현상을 이용하여, 나노링 구조의 외경, 내경, 높이 등의 기하학적인 구조 변화에 따른 전자기파의 산란 효과 변화를 유한차분 시간영역(Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 방법을 이용하여 연구하였다.¹⁹⁾ 특히, Ag 나노링에서 나노링의 구조 및 배열의 변화에 따른 기판 방향으로의 전방 산란 효과 연구를 통해 나노 링 구조에 의한 광흡수의 변화를 연구하였다.

2. 계산 방법

본 연구에서는 FDTD 방법을 이용하여, 금속 나노 구조체의 산란 효과를 알아보기 위하여 Si 기판 위에 Ag 나노링이 존재하는 구조를 사용하였다. Fig. 1에 본 연

Fig. 1. Schematic diagram of the FDTD calculation structures.

구에서 사용한 계산 구조의 모식도를 나타내었다. Si 기판과 Ag 나노링 사이에는 10 nm 두께의 native oxide가 있는 것으로 가정하였다. 본 계산에서는 Ag 나노링 패턴에 의한 광흡수 변화를 알아보기 위하여 PML(Perfect Matched Layer) 경계 조건을 바탕으로, mesh size는 Ag 나노링 주변으로 2~5 nm로 설정하였다. Light source는 평면파(plane wave)를 이용하여 파장에 따른 흡수율의 변화와 전기장의 분포를 계산하였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같이 Ag 나노링의 위쪽에서 아래쪽 방향으로 수직으로 입사되었다. 또한 나노 구조체에 의한 산란 효과를 계산하기 위해서는 TFSF(Total-Field Scattered-Field) light source를 사용하였으며, 방향에 따른 산란 효과를 확인하기 위해 Ag 나노링 패턴을 중심으로 6면체의 scattered field region을 설정하였다. Ag 나노링의 기하학적인 구조 변화에 의한 기판으로의 전방 산란 효과를 구하기 위하여 6면체의 각 면에 산란되는 양을 구하였으며, 이를 바탕으로 기판면으로 산란되는 양을 6면체 전체면에 산란되는 양으로 나눈으로써 기판으로 전방 산란되는 비율을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

Ag 나노링의 기하학적인 구조의 변화에 따른 산란 효과를 알아보기 위해 Ag 나노링의 외경(d_{out})과 내경(d_{in}), 높이(h)를 변화시켰으며, 이러한 변화에 따른 기판 방향으로 산란되는 양과 소광율(extinction)을 계산하였다. Fig. 2(a)는 내경(d_{in})이 50 nm, 높이(h)가 100 nm인 Ag 나노링의 d_{out} 의 변화에 따른 기판 방향으로의 산란율을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 d_{out} 이 증가함에 따라 파장대 300 nm에서 600 nm 부근에서의 기판으로의 산란 양이 점점 감소하는 것을 확인할 수 있다. 단파장 영역대에서의 산란율 감소 현상을 확인하기 위하여 평면파(plane wave)를 이용하여 파장에 따른 소광율을 계산하였다. Fig. 2(b)에 평면파를 이용하여 파장에 따른 소광율 변화를 계산한 결과를 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 d_{out} 이 증가함에 따라 파장대 300 nm에서 600 nm 부근에서 나노링의 소광율이 증가하는 것을 확인할 수 있으며 이는 나노링에 형성된 LSPR 모드에 의한 것으로 이해할 수 있다. d_{out} 의 변화에 따른 기판으로의 전방 산란 효과의 변화를 이해하기 위해 나노링 및 기판의 y-z 평면에서의 전기장 분포를 계산하였다. Fig. 2(c)에 전방산란 효과의 변화가 가장 큰 500 nm 파장 부근에서 d_{out} 의 변화에 따른 전기장 분포의 변화를 나타내었다. $d_{out} = 100$ nm인 경우 나노링에 형성된 LSPR 모드에 의한 광흡수가 작아 기판내부로 산란 효과가 큰 것을 확인할 수 있으며, d_{out} 이 증가함에

Fig. 2. (a) Fraction of light scattered into the Si substrate with respect to d_{out} of Ag nanoring for $d_{in} = 50$ nm and $h = 50$ nm. (b) Variation of extinction spectra with respect to d_{out} of Ag nanoring for $d_{in} = 50$ nm and $h = 50$ nm. (c) y-z plane electric field intensity distribution map at $\lambda = 500$ nm for $d_{out} = 100, 150, 250$ nm. The inset shows x-y plane electric field intensity distribution map.

Fig. 3. (a) Fraction of light scattered into substrate with respect to h of Ag nanoring for $d_{in} = 50$ nm and $d_{out} = 100$ nm, (b) Variation of extinction spectra with respect to h of Ag nanoring for $d_{in} = 50$ nm and $d_{out} = 100$ nm and (c) y-z plane electric field intensity distribution map at $\lambda = 500$ nm for $h = 50, 100$ and 125 nm. The inset shows x-y plane electric field intensity distribution map.

따라 나노링의 LSPR 모드의 증폭과 함께 기판에서의 전기장의 세기가 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 3(a)은 나노링의 d_{in} 이 50 nm, d_{out} 이 100 nm인 Ag 나노링의 h 의 변화에 따른 기판 방향으로의 산란율을 나

타낸 것이다. Fig. 2에서 d_{out} 의 증가에 따라 파장대 300 nm에서 600 nm부근에서의 기관으로의 산란율이 감소하는 것과 같이 h 의 증가에 의해서도 파장대 300 nm에서 600 nm 부근에서 기관으로의 산란 양이 점점 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)는 평면파를 이용해 소광율을 계산한 것이다. Fig. 2(b)와 동일하게 h 의 증가에 따라 나노링의 흡수율이 증가함을 확인할 수 있으며, LSPR 모드의 위치가 h 의 증가에 따라 장파장 영역으로 shift하는 것을 알 수 있다. 특히, h 가 125 nm 인 경우 LSPR 모드의 중심 파장은 440 nm에 위치하며, 이로 인해 기관으로의 전방산란 효과가 600 nm 대역까지 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3(c)의 h 의 변화에 의한 전기장 분포 변화 역시 Fig. 2(c)와 동일하게 h 의 증가에 따라 LSPR 모드의 증폭으로 인해 기관 내부의 전기장 세기가 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 Fig. 2와 Fig. 3의 결과를 통해 d_{out} 과 h 의 변화에 따른 기관으로의 산란율의 변화에 대해 확인할 수 있었으며, d_{out} 과 h 의 증가는 400 nm 부근의 LSPR 모드의 증폭에 의해 단파장 대역에서 전체적인 산란율을 감소시킨다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4(a)는 d_{out} 이 100 nm이고 h 가 50 nm인 Ag 나노링의 d_{in} 의 변화에 따른 기관 방향으로의 산란율을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 d_{out} 이 100

nm이고 d_{in} 이 20 nm인 경우 450 nm 이상의 파장에서는 산란율이 큰 것을 확인할 수 있으며, d_{in} 이 증가함에 따라 600 nm 이상의 장파장대역의 산란율은 변화가 없으나 370 nm 부근의 단파장 대역에서는 새로운 peak이 형성되면서 산란율이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)에 파장에 따른 소광율의 변화를 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 d_{in} 이 증가함에 따라 370 nm 파장에서 LSPR 모드에 의한 소광율이 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)에는 400 nm 파장에서의 d_{in} 의 변화에 따른 LSPR 모드의 변화에 따른 전기장 분포의 변화를 나타내었다. d_{in} 의 증가에 따라 Ag 나노링 내부의 LSPR 모드의 감쇠 및 이에 따른 기관 내부의 전기장의 세기 증가를 확인할 수 있다. 한가지 흥미로운 점은 $d_{in}=80$ nm인 경우 전방산란 효과가 매우 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 Fig. 4(c)에 나타낸 바와 같이 80 nm인 경우 링의 두께가 얇아지면서 나노링의 lateral 모드보다 vertical 모드의 생성과 관계된 것으로 판단할 수 있다. Fig. 5에 d_{out} 이 250 nm, h 는 50 nm인 Ag 나노링에 대한 산란율, 흡수율 및 전기장의 세기 분포를 나타내었다. d_{out} 이 250 nm인 나노링의 경우 d_{out} 이 100 nm인 경우와 같이 d_{in} 이 증가에 따른 LSPR 모드의 감쇠와 이에 따른 흡수율의 감소 및 전방산란의 증가를 확인할 수 있다. 이를 통해 나노 링에서 단파장 영역에서의 전방산란

Fig. 4. (a) Fraction of light scattered into substrate with respect to d_{in} of Ag nanoring for $d_{out}=100$ nm and $h=50$ nm, (b) Variation of extinction spectra with respect to d_{in} of Ag nanoring for $d_{out}=100$ nm and $h=50$ nm and (c) y-z plane electric field intensity distribution map at $\lambda=400$ nm for $d_{in}=20, 40$ and 80 nm. The inset shows x-y plane electric field intensity distribution map.

Fig. 5. (a) Fraction of light scattered into substrate with respect to d_{in} of Ag nanoring for $d_{out}=250$ nm and $h=50$ nm, (b) Variation of extinction spectra with respect to d_{in} of Ag nanoring for $d_{out}=250$ nm and $h=50$ nm and (c) y-z plane electric field intensity distribution map at $\lambda=400$ nm for $d_{in}=50, 150$ and 230 nm. The inset shows x-y plane electric field intensity distribution.

Fig. 6. Normalized scattering efficiency into the Si substrate as a function of d_{in} / d_{out} .

효과는 나노 링에 존재하는 LSPR 모드의 감쇠 및 증가와 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있으며, 장파장 영역의 산란율은 링의 폭에 관계가 없음을 알 수 있다.

나노링의 외경 및 내경의 변화에 따른 전방산란 효과의 변화를 이해하기 위해 Fig. 2, 4, 5에서 내경 및 외

경의 변화에 따른 전방산란율을 파장에 따라 적분하여 기판방향으로의 산란율을 계산하였다. Fig. 6에 h 가 50 nm로 고정된 경우 d_{out} 이 각각 100 nm, 150 nm, 200 nm, 250 nm를 가지는 Ag 나노링의 d_{in} 변화에 따른 산란율의 변화를 나타내었다. 각각의 나노링에 공통적으로 나타났던 현상은 d_{in} 의 변화에 따라 단파장 영역에서의 산란율이 증가하였다는 것이다. 하지만 100 nm, 150 nm의 d_{out} 을 가지는 Ag 나노링의 경우, d_{in} 의 크기가 증가함에 따라 단파장 영역에서의 산란율이 증가하지만, d_{in} 에 따른 산란율은 d_{in} 의 크기가 증가함에 따라 전체적인 산란율이 감소하면서 단파장 영역의 산란율이 전체적인 산란율에 큰 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. 반면에 d_{out} 이 200 nm, 250 nm를 가지는 Ag 나노링의 경우, d_{in} 의 증가에 따라 역시 단파장 영역에서의 산란율이 증가하며, 100 nm, 150 nm의 경우와는 달리 d_{in} 의 변화에 따른 전체적인 산란율이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 단파장 영역에서의 흡수율이 전체적인 산란율에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 이 경우 d_{in} 의 크기가 d_{out} 의 3/5 정도의 크기가 되었을 때 산란율이 가장 큰 것을 알 수 있다. 즉, Ag 나노링의 기하학적인 구조 변화에 의해 산란 효과가 크게 변화함을 알 수 있고, 특히 d_{in} 의 크기는 전체적인 산란율에 영향을 미치며 200 nm 이상의 d_{out} 을 갖는 경우, 기판으로의 산란율을 증가시키기 위해서는 d_{in} 의 크기를 고려해야 함을 확인할 수 있다.

Fig. 7. (a) Schematics of Ag nanoring array, (b) Absorption in the Si substrate for Ag nanoring with different period and (c) The electric field intensity distribution at $\lambda = 500$ nm for $a = 150$ and 300 nm.

Fig. 8. (a) Enhancement of integrated quantum efficiency for Ag nanoring $d_{in} = 50$ nm, $d_{out} = 100$ nm and $h = 50$ nm with respect to the period and (b) Integrated quantum efficiency for Ag nanoring $d_{in} = 50$ nm, $d_{out} = 100$ nm and $h = 50$ nm with respect to the period.

실제로 Ag 나노링과 같은 금속 나노 구조체를 소자에 이용할 경우, 금속 나노 구조체의 구조뿐만 아니라 주기적인 배열이 중요하다. 구조체를 주기적인 격자를 가지도록 배열하게 되면 구조체들이 놓인 위치의 주기적인 성질에 하여 흡수율이 변화하기 때문이다. 주기의 변화 따른 흡수율을 알아보기 위해 Fig. 7(a)와 같은 구조를 만들었고, periodic boundary와 평면파 light source를 이용하여 주기(a)의 변화에 따른 기판에서의 흡수율을 계산

하였다. Fig. 7(b)는 주기에 따른 기판에서의 흡수율을 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 500 nm 파장 부근에서 흡수율이 가장 크게 나타나며, 주기의 변화에 따라 500 nm 파장 이하에서는 주기가 길어질수록 흡수율이 증가하며, 파장대 500 nm에서 600 nm 부근에서는 주기(a)가 짧을수록 흡수율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 7(c)는 500 nm 파장에서 나노링 및 기판에서의 전기장 세기 분포를 나타낸 것으로 주기가 짧은

150 nm일 때 기관으로의 흡수율이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8(a)는 Fig. 7(b)의 결과를 바탕으로 quantum efficiency(q)를 계산한 결과이다. quantum efficiency(q)는 Ag 나노링 패턴이 존재할 때 흡수율과 bare Si에서의 기관 흡수율의 비를 나타낸 것으로, Ag 나노링 배열이 존재하는 경우 양자효율이 향상됨을 확인할 수 있다. 파장대 450 nm에서 600 nm 부근과 700 nm에서 800 nm 부근에서 bare Si에 비해 흡수율 좋으며, 특히 주기의 변화에 따라 900 nm 파장 부근에서의 흡수율 변화가 가장 큼을 알 수 있다. Fig. 8(b)는 각 주기(a)에 따른 전체 흡수율을 비교한 것으로 주기가 200 nm 일 때 흡수율이 가장 높은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 전체 흡수율을 향상 시키기 위해서는 각 나노 구조체의 기하학적 형태뿐 아니라 주기적 배열에 의한 효과도 고려해야 한다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 FDTD(Finite-Difference Time-Domain) 방법을 이용하여, Ag 나노링의 기하학적인 구조의 변화 및 주기적 배열의 변화에 따른 산란효과를 연구하였다. Ag 나노링의 패턴형태 및 주기의 변화에 의한 전방산란 효과 계산을 통해, 기하학적인 구조의 변화가 산란 효과에 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 외경과 높이의 변화에 따른 산란 효과의 경우, 외경과 높이가 커질수록 기관으로의 산란율이 감소하는 경향을 나타내었으며, 반면에 내경의 크기 변화에 따라서는 단파장 영역에서 peak이 생성되고 생성된 peak이 전체 산란율에 영향을 미침을 알 수 있었다. 특히, 외경이 200 nm 이상의 크기를 가지는 링 구조에서 산란 효과를 향상시키기 위해서는 내경의 크기가 중요한 것을 확인할 수 있었다. Ag 나노링의 주기적인 배열에 의한 기관에서의 흡수율의 경우, 주기의 변화가 전체적인 흡수율에 영향을 미치며, 흡수율을 향상시키기 위해서는 주기적인 구조 변화에 따른 흡수율의 변화를 고려해야 함을 알 수 있었다. 이와 같은 연구를 통해 Ag 나노링이 전방으로의 산란 효과를 일으킴을 확인할 수 있었고, 이를 이용하여 입사된 빛의 기관으로의 전방 산란을 유도함으로써 효과적인 광 흡수가 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korea govern-

ment (MEST) (No. 2012-043865) and Korea Research Council for Industrial Science & Technology.

참 고 문 헌

1. F. J. Beck, A. Polman and K. R. Catchpole. *J. Appl. Phys.*, **105**, 114310 (2009).
2. L. Tsakalakos, *Nanotechnology for Photovoltaics*, p. 391, CRC Press, FL, USA (2010).
3. H. A. Atwater and A. Polman, *Nat. Mater.*, **9**(3), 205 (2010).
4. J. W. Lee, *Optical Science and Technology*, **15**(1), 49 (2011) (in Korean).
5. Y. J. Kim, J. S. Cho, J. C. Lee, J. S. Wang, J. S. Song and J. H. Yoon, *Kor. J. Mater. Res.*, **19**(5), 245 (2009) (in Korean).
6. V. E. Ferry, J. N. Munday and H. A. Atwater, *Adv. Mater.*, **22**, 4794 (2010).
7. K. R. Catchpole and A. Polman, *Optic. Express*, **16**, 21793 (2008).
8. D. M. Schaadt, B. Feng and E. T. Yu, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 063106 (2005).
9. D. Derkacs, S. H. Lim, P. Matheu, W. Mar and E. T. Yu, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 093103 (2006).
10. S. Pillai, K. R. Catchpole, T. Trupke and M. A. Green, *J. Appl. Phys.*, **101**, 093105 (2007).
11. M. Westphalen, U. Kreibig, J. Rostalski, H. Lüth and D. Meissner, *Sol. Energ. Mater. Sol. Cell.*, **61**, 97 (2000).
12. B. P. Rand, P. Peumans and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, **96**, 7519 (2004).
13. A. J. Morfa, K. L. Rowlen, T. H. Reilly III, M. J. Romero and J. V. D. Lagemaat, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 013504 (2008).
14. R. B. Konda, R. Mundle, H. Mustafa, O. Bamiduro, A. K. Pradhan, U. N. Roy, Y. Cui and A. Burger, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 191111 (2007).
15. C. Hägglund, M. Zäch and B. Kasemo, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 013113 (2008).
16. K. R. Catchpole and A. Polman, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 191113 (2008).
17. C. Huang, J. Ye, S. Wang, T. Stakenborg and L. Lagae, *Appl. Phys. Lett.*, **100**, 173114 (2012).
18. X. F. Han, Z. C. Wen and H. X. Wei, *J. Appl. Phys.*, **103**, 07E933 (2008).
19. FDTD solutions (On the web). Retrieved August 1, 2012 from <http://www.lumerical.com>