

수소화 비정질 실리콘 기반 분배 브래그 하부 반사기를 적용한 고효율 광 격자 커플러

박지환*

High-Efficiency Grating Coupler with Distributed-Bragg Bottom Reflector Based on Hydrogenated Amorphous Silicon

Ji-Hwan Park*

요약

본 연구에서는 수소화 비정질 실리콘 (a-Si:H) 기반 분배 브래그 반사기 (Distributed Bragg Reflector, DBR)을 적용한 광 격자 커플러를 제안하여 라이다 시스템에서 고효율의 나노 광 방사기로 사용할 수 있다는 가능성을 보여주었다. 분배 브래그 반사기는 아랫방향으로 누설되는 광학 장을 감소시켜 커플링 효율을 높게 한다. 결과적으로 제안된 광 격자 커플러는 기존의 광 격자 커플러와 비교하여 약 1.4 배가 높은 far-field 세기를 가진다는 것을 보여주었다.

ABSTRACT

In this paper, hydrogenated amorphous silicon(a-Si:H) grating coupler with distributed Bragg reflector(DBR) is proposed to achieve high-efficiency nanophotonic radiator for Light Detection and Ranging(LiDAR) application. The DBR reduces downward leakage of the optical field below the grating region. As a result, the far-field intensity shows about 1.4 times stronger, compared to the common grating coupler without the DBR.

키워드

Hydrogenated Amorphous Silicon, Distributed-Bragg Reflector, Optical Communication, Grating Coupler
수소화 비정질 실리콘, 분배 브래그 반사기, 광통신, 광 격자 커플러

1. 서론

광 커플러는 광소자에서 가장 중요한 구성요소 중 하나이다. 광신호의 분기 및 결합 기능은 전기신호의 결합 및 분기와 마찬가지로 각종 광통신망의 구성에 있어서 가장 기초적인 기능이지만 실제로 광섬유의 특성상 분기 및 결합 기능의 구현이 용이하지 않으며 별

도의 기능 부품으로서 커플러를 사용하게 된다[2]. 광 커플러에는 광섬유와 광 격자 형태의 커플러가 있으며 커플러의 커플링 효율을 높이고 대역폭을 넓히기 위해서 최근까지 많은 연구들이 진행되었다. 광 결합 및 광 분배 작용을 하는 1×7 가늘어진 아크릴 원통 형태의 플라스틱 광섬유 커플러가 연구되었고 광 누설 손실을 줄이기 위해 단면이 원형에서 구형으로 천천히

* 교신저자 : 국방기술품질원 지휘정찰센터
• 접수일 : 2021. 01. 29
• 수정완료일 : 2021. 03. 09
• 게재확정일 : 2021. 04. 17

• Received : Jan. 29, 2021, Revised : Mar. 09, 2021, Accepted : Apr. 17, 2021
• Corresponding Author : Ji-Hwan Park
Dept. C4ISR Systems Center, Defense Agency for Technology and Quality
Email : pjh1400@dtq.re.kr

바편 1×4 형태의 플라스틱 광섬유 커플러가 제안되었다[2-3]. 이러한 구조는 원자력발전소의 전력이 상실되는 사고가 발생하더라도 사용후핵연료 저장조의 수위를 감시할 수 있는 광센서로 활용될 수 있다[4]. 하지만 광섬유는 분배 및 커플러 기능의 구현이 용이하지 않아 빛을 국한시키는 공진기의 역할로서 광섬유 팁의 곡률 반경에 관한 연구가 진행된 바 있다[5].

광섬유 커플러와 달리 광 격자 커플러는 도파로 구조에서 격자를 통해 빛이 입사하거나 방사하는 반도체 공정을 통해 만들어지며 이와 관련하여 광섬유에서 광 격자구조 도파로 결합기 설계를 위한 결합 모드가 이론적으로 분석되었다[6]. 커플링 이론의 연구뿐 아니라 광 격자 커플러의 설계 또한 최근까지 활발하게 진행되고 있으며 광 격자 커플러의 커플링 효율을 향상시키기 위하여 얇은 금 거울을 포함한 폴리머 광 격자 커플러를 제작하여 빛의 방향성을 증대시켜 효율성을 높이거나[7] 질화 규소 (Si_3N_4) 기반의 광 격자 커플러 아랫부분에 비정질 실리콘 (a-Si)이 산화규소 (SiO_2) 거울을 제작하였다 [8]. 하지만 금속 거울은 온도에 취약하고 질화 규소 기반의 광 격자 커플러는 실리콘의 굴절률 ($n \sim 3.45$)보다 작은 굴절률 ($n \sim 2$)의 물질이기 때문에 빛을 도파로에 잘 국한시키지 못하는 문제점이 있다. 이외에도 최근에는 비선형 전자광학 특성을 가진 니오브산 리튬(LiNbO_3) 기반의 광 격자 커플러를 제작하여 높은 커플링 효율과 낮은 삽입손실을 증명한바 있다 [9-11]. 하지만 니오브산 리튬 공정(LiNbO_3)은 일반적인 CMOS 공정 호환성이 낮은 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 수소화 비정질 실리콘 (a-Si:H) 기반 분배 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector, DBR)를 적용한 광 격자 커플러를 제안한다.

II. 광 격자 커플러 설계 및 검증

본 연구는 Forouhi-Bloomer amorphous dispersion formula (F&B formula)를 통해 비정질실리콘의 굴절률과 흡광계수를 계산하고 이를 바탕으로 분배 브래그 하부 반사기를 제안하였다. 제안된 구조는 FDTD(Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

2.1 수소화 비정질 실리콘의 이론적 분석

FDTD(Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션 을 위해서 파장에 따른 수소화 비정질 실리콘 (a-Si:H)의 굴절률과 흡광계수 자료가 필요하다. 본 연구에서는 Forouhi-Bloomer amorphous dispersion formula (F&B formula)를 도입하였다[12]. 해당 내용을 바탕으로 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)의 흡광계수를 이론적으로 산출할 수 있고 Kramer-kronig Relation을 통해 에너지에 대한 복소 굴절률을 계산할 수 있다. 그림 1은 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)의 굴절률과 흡광계수 결과를 빛 에너지에 대한 그래프로 나타낸 것이다. 광통신에서 흔히 사용하는 1550nm 파장영역(빛 에너지로 치환 시 약 0.8 eV)에서 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)의 굴절률은 약 3.36, 흡광계수는 거의 0이 되어 일반적인 실리콘(Si)과 유사한 값을 가지는 것을 확인하였다. 이는 기존 전자소자에서 활용되었던 수소화 비정질 실리콘(a-Si:H)이 광소자로서 적합한 광학적인 특성을 가진다는 것을 의미한다.

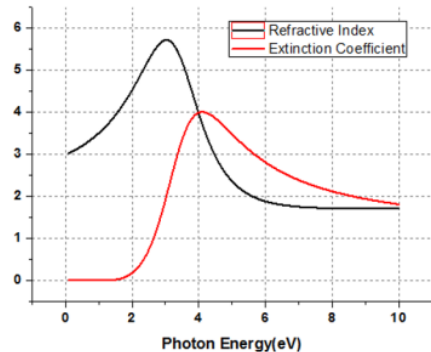


그림 1. 수소화 비정질실리콘(a-Si:H)의 굴절률과 흡광계수
Fig. 1 Refractive index and Extinction coefficient data versus energy of a-Si:H

2.2 소자 설계와 FDTD 시뮬레이션

1550 nm 파장에서 분배 브래그 반사기의 수소화 비정질 실리콘의 굴절률은 위 수소화 비정질 실리콘의 이론적 분석에 따라 3.36으로 확인하였고 일반적인 이산화규소의 굴절률은 1.45 이다. 브래그 반사기는 빛을 반사시키는 거울 역할을 하고 굴절률과 파장에 따라 두께가 결정되며 관계는 아래 식(1)과 같다.

$$d = \frac{\lambda}{4n} \quad (1)$$

여기서 d 는 유전체의 두께, λ 는 유전체에 입사하는 빛의 파장, n 은 유전체의 굴절률이다.

상기 브래그 조건에 따라 일정한 파장 영역에서 굴절률과 유전체의 두께는 반비례 관계라는 것을 확인할 수 있으며 결과적으로 수소화 비정질 실리콘/이산화규소 층 두께를 각각 250 nm, 100 nm으로 정했다. 또 광 격자부분은 2D FDTD(Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션을 통해 파장을 1550 nm로 고정시키고 커플링 효율이 최대가 되는 격자주기와 duty ratio를 각각 660 nm, 0.66으로 최적화하였다. 상단 수소화 비정질 실리콘의 두께는 220 nm, 격자 식각 깊이는 70 nm, 매물 산화막의 두께는 2 μm 로 고정시켰다. 그림 2는 제안된 광 격자 커플러 구조의 단면을 나타내며 광원은 기본모드를 사용하였다.

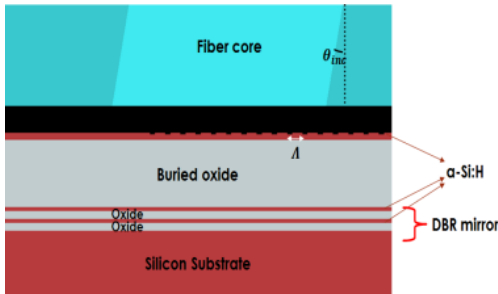


그림 2. 제안된 커플러 구조
Fig. 2 Schematic of the proposed structure

그림 2의 제안된 수소화 비정질 실리콘 기반 광 격자 커플러 역시 Phase matching condition에 따른 광 격자 방정식이 성립하는데 결과는 식(2)과 같다.

$$n_{avg} = n_{inc} \sin \theta_{inc} + \frac{\lambda_0}{\Lambda} \quad (2)$$

여기서 n_{avg} 는 광 격자부분의 유효굴절률, n_{inc} 는 입사지역의 굴절률, θ_{inc} 는 입사 커플링각도 (이는 빛이 방사하는 경우 방사각도를 뜻하기도 함), λ_0 는 중심파장, Λ 는 격자주기이다.

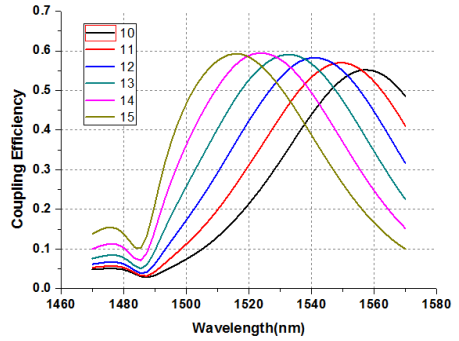


그림 3. 입사 커플링 각도(10~15°)에 따른 커플링 효율

Fig. 3 Coupling efficiency of the proposed structure depending on coupling angle from 10 to 15°

일반적으로 입사지역의 굴절률 n_{inc} , 격자주기 Λ 는 상기 구조에서 고정된 변수이다. 식(2)에 따라 입사 커플링각도 θ_{inc} 와 중심파장은 반비례 관계가 된다. 입사 커플링각도에 따라 중심파장과 커플링효율의 관계는 2D FDTD 시뮬레이션 결과에 따라 그림 3과 같으며 입사각을 10~15°로 증가시키면 중심파장이 작아지는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 14~15°에서 커플링 효율이 가장 높았기 때문에 제안된 구조에서는 입사 각도를 15°로 고정하였다.

입사 각도를 고정시킴으로써 결국 광 격자 부분에서 빛이 느끼는 유효굴절률 n_{avg} 에 따라 광 격자 커플러의 중심파장 λ_0 이 변할 것이라는 예상이 가능하다. 광 격자 부분에서 빛이 느끼는 유효 굴절률은 일반적으로 분배 브래그 반사기가 없는 광 격자 커플러인 경우와 본 연구에서 제안한 반사기가 있는 광 격자 커플러인 경우가 다를 수 있기 때문에 시뮬레이션이 필요하다. 광 격자 커플러에서 분배 브래그 반사기가 있는 경우와 없는 경우 각각 커플링 효율에 대한 2D FDTD(: Finite Difference Time Domain) 시뮬레이션 결과, 파장영역을 1500 ~ 1600 nm로 조율했을 때(광통신에서 광섬유 손실은 1500 ~ 1600 nm에서 가장 낮음.) 그림 4와 같이 분배 브래그 반사기가 있는 경우 중심파장 1523 nm에서 커플링 손실이 -1.17 dB, 분배 브래그 반사기가 없는 경우 중심파장 1525 nm에서 커플링 손실이 -3.3 dB인 결과를 얻었다. 이

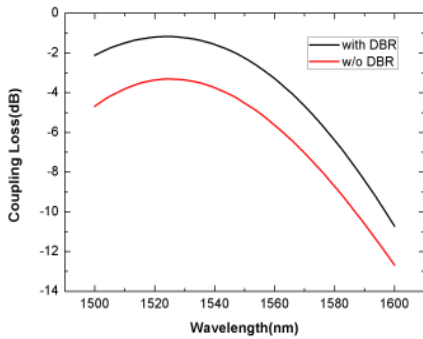


그림 4. 브래그 반사기 유무에 따른 파장 별 커플링 손실

Fig. 4 Coupling efficiency of the structure with DBR (black line) and without DBR (red line)

는 분배 브래그 반사기가 존재할 때 효율이 약 29.6%가 높다는 것을 보여준다. 물론 이상적인 시뮬레이션 결과이기 때문에 실제 공정을 통한 소자 제작 시 다양한 공정변수에 따른 손실이 존재할 수 있다. 본 연구에서는 광도파로의 옆면 거침에 따른 산란손실이나 수소화 비정질 실리콘의 흡수손실 등 실제 소자의 손실은 제외한다. 제안된 소자의 커플링 효율 향상 효과는 빛이 광 격자 커플러로 입사할 때, 실리콘 기판 하단으로 가는 빛이 존재하는데 이 빛을 거울 역할을 하는 분배 브래그 반사기가 다시 반사시켜 전체적인 광 격자 커플러의 효과가 향상된 것으로 해석된다. 분배 브래그 반사기가 있는 경우 분배 브래그 반사기가 없는 경우의 중심파장과 2nm의 차이밖에 보이지 않는 것은 브래그 반사기의 유무에 상관없이 광 격자 커플러 유효굴절률의 차이가 미미하다는 것을 의미하며 브래그 반사기가 있는 광 격자 커플러를 충분히 기존 파장영역에서 사용할 수 있다는 것을 보여준다.

분배 브래그 반사기가 있는 광 격자 커플러를 라이다 시스템에서의 방사기로 사용한다면 상기 커플링 효율이 증가된 결과에 따라 far-field 세기가 증가한다고 예상할 수 있다. FDTD 시뮬레이션 결과, 그림 5와 같이 종 방향 각도(Longitudinal angle) 즉, 광도파로 방향에 대한 각도에 따라 far-field 세기가 변하게 된다. 제안된 광 격자 커플러는 방사각도를 약 15°로 설계했기 때문에 다른 각도로 방사되는 빛은 거의 없다는 것을 시뮬레이션 결과 확인할 수 있었으며 약 15°의 종 방향 각도(파장 : 1550 nm)에서 빛이 집

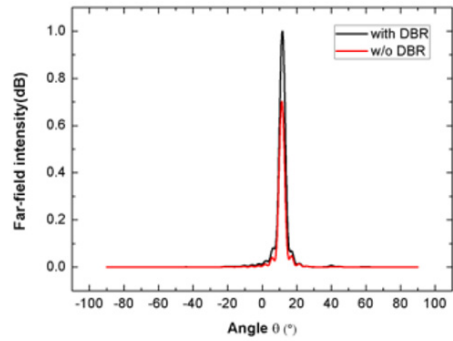


그림 5. 종 방향 각도에 따른 far-field 세기

Fig. 5 Far-field intensity depending on longitudinal angle

중적으로 방사되는 것을 그림 5를 통해 확인할 수 있다. 분배 브래그 반사기의 유무에 상관없이 방사되는 빛의 각도는 거의 변화가 없었고 분배 브래그 반사기가 있는 구조가 분배 브래그 반사기가 없는 구조보다 far-field 세기가 상대적으로 약 1.4 배 크다는 것을 확인할 수 있었다. 이를 활용하면 Far-field 세기가 커졌기 때문에 라이다의 중요 성능 지표인 측정거리를 증가시킬 수 있을 것으로 예상되며 라이다 시스템의 고효율 방사기로 분배 브래그 반사기가 있는 광 격자 커플러를 활용할 수 있음을 의미한다. 특히 상기 결과는 방사기 1 개에 대한 FDTD 시뮬레이션 결과이지만 본 연구에서 광 격자 커플러의 너비나 길이의 변화 없이 구조를 제안하였기 때문에 실제 광 위상 배열에서 N×N 개의 방사기를 활용하는 라이다 시스템에서도 충분히 응용이 가능하다. 라이다 시스템에서 방사기로 사용하기 위해서는 Far-field 세기도 중요하지만 방사되는 빔의 폭도 중요하다. 빔이 방사되면서 파장에 따라 폭이 일정하지 않으면 해당 파장 영역에서 라이다 방사기로 활용할 수 없다. 따라서 그림 6과 같이 파장영역을 1500 ~ 1600 nm로 조절하여 빔 폭(가로 축)에 대한 시뮬레이션 결과 파장에 독립적으로 far-field 세기와 빔 폭(~3.75°)이 일정하여 라이다 시스템의 방사기로 충분히 활용할 수 있다는 것을 보여주었다.

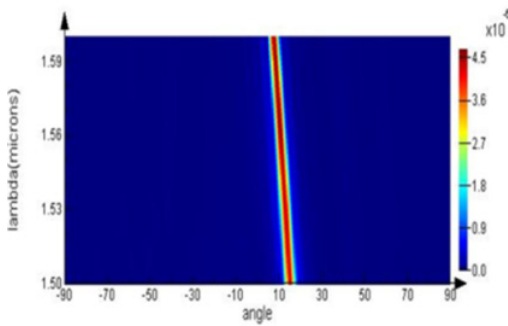


그림 6. 파장(1500~1600 nm)에 따른 far-field 세기
Fig. 6 Far-field intensity depending on wavelength(1500~1600 nm)

III. 결 론

본 연구의 결과는 실리콘 포토닉스 광소자 제작을 위해 사용했던 SOI (Silicon-on-Insulator)를 대체하여 CMOS 공정으로 제작가능한 수소화 비정질 실리콘을 광소자 제작에 적용할 수 있음을 보여준다. 수소화 비정질 실리콘 공정은 기존 CMOS 공정 호환가능하며 SOI 공정보다 공정의 자유도가 높아 분배 브래그 반사기와 같은 추가적인 공정이 비교적 쉽고 실제 공정 온도가 400 °C 이하에서 진행되기 때문에 후 공정을 통하여 라이다 시스템의 방사기 부분을 제작할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 수소화 비정질 실리콘 기반 광소자를 제작하기에 앞서 수소화 비정질 실리콘의 이론적 분석을 통해 굴절률과 흡광계수를 구하여 광소자의 적절성을 검토하였으며 수소화 비정질 실리콘이 광소자의 기본 물질로 충분히 사용될 수 있음을 보여주었다. 이후 수소화 비정질 실리콘 기반 분배 브래그 하부 반사기를 적용한 광 격자 커플러를 제안함으로써 기존 광 격자 커플러에 비해 약 29.6 % 높은 커플링 효율을 FDTD 시뮬레이션을 통해 밝혀냈다. 이를 기반으로 제안된 광 격자 커플러는 라이다 시스템에서 빔 폭과 far-field 세기가 파장에 독립하며 기존보다 1.4 배 높은 far-field 세기를 갖는다는 결과를 도출하였다.

결과적으로 수소화 비정질 실리콘 기반의 광소자는 미래 광 집적 회로에서 효율적인 성능을 발휘할 것으

로 예상되며 커플러나 방사기의 기능 뿐 아니라 다양한 기능의 광소자로 제작되어 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] J. Shin, J. Sim, M. Jeong, and T. Ghoy, "Current Technological Trends in Optical Couplers," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 8, no. 3, 1993, pp. 207-221.
- [2] S. Min and K. Kim, "Fabrication and Characterization 1×7 Plastic Optical Fiber Coupler Using Tapered Acrylic Cylinder," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 1, 2014, pp. 11-16.
- [3] K. Kim, S. Min, and J. Yun, "Low Loss Plastic Optical Fiber Coupler Incorporating a Polymer Tapering Waveguide Region," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 4, 2012, pp. 867-871.
- [4] S. Kim and H. Lee, "Remote water level monitoring system based on reflected optical power detection with an optical coupler for spent fuel pool at nuclear power plant," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, 2019, pp. 505-512.
- [5] J. Choi, G. Son and K. Yu, "A Study on the Radius of Curvature of Concave Optical Fiber Tips fabricated by Laser-Induced Photothermal Effect," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, 2019, pp. 871-876.
- [6] H.-J. Heo and S.-H. Kim, "Analysis of Coupled Mode Theory for Design of Coupler Between Optical Fiber And Grating Assisted Waveguide," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 12, no. 4, 2017, pp. 561-568.
- [7] Y. Xu, F. Wang, Y. Gao, W. Chen, C. Chen, X. Wang, Y. Yi, X. Sun, and D. Zhang, "Efficient polymer waveguide grating coupler with directionality enhancement," *Opt.*

- Communications*, vol. 463, May 2020, pp. 125418-0.
- [8] H. Zhang, C. Li, X. Tu, J. Song, H. Zhou, X. Luo, Y. Huang, M. Yu, and G. Q. Lo, "Efficient silicon nitride grating coupler with distributed Bragg reflectors," *Opt. Express*, vol. 22, no. 18, 2014, pp. 21800-21805.
- [9] N. Yao, J. Zhou, R. Gao, J. Lin, M. Wang, Y. Cheng, W. Fang, and L. Tong, "Efficient light coupling between an ultra-low loss lithium niobate waveguide and an adiabatically tapered single mode optical fiber," *Opt. Express*, vol. 28, no. 8, 2020, pp. 12416-12423.
- [10] Z. Chen, R. Peng, Y. Wang, H. Zhu, and H. Hu, "Grating coupler on lithium niobate thin film waveguide with a metal bottom reflector," *Opt. Mater. Express*, vol. 7, no. 11, 2017, pp. 4010-4017.
- [11] I. Krasnokutska, R. J. Chapman, J. L. J. Tambasco, and A. Peruzzo, "High coupling efficiency grating couplers on lithium niobate on insulator," *Opt. Express*, vol. 27, no. 13, 2019, pp. 17681-17685.
- [12] A. R. Forouhi and I. Bloomer, "Optical dispersion relations for amorphous semiconductors and amorphous dielectrics," *Phys. Review*, vol. 34, no. 10, 1986, pp. 7018-7026.

저자 소개



박지환(Ji-Hwan Park)

2014년 고려대학교 전기전자전파
공학부 졸업(공학사)

2016년 한국과학기술원 전기 및
전자공학부 졸업(공학석사)

2016년 ~ 현재 국방기술품질원 연구원

※ 관심분야 : 라이다 시스템, 광통신, 실리콘 포토
닉스