

분배 브래그 반사기가 집적된 실리콘 기반 격자 구조를 이용한 광학 빔 방사 효율 및 조향 선폭 성능 향상

홍유승² · 조준형³ · 성혁기^{1*}

A High Radiation Efficiency and Narrow Beam Width of Optical Beam Steering Using a Silicon-based Grating Structure Integrated with Distributed Bragg Reflectors

Yoo-Seung Hong² · Jun-Hyung Cho³ · Hyuk-Kee Sung^{1*}

^{1*}Associate Professor, School of Electrical and Electronics Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

²Graduate student, School of Electrical and Electronics Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

³Ph.D. student, School of Electrical and Electronics Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

요 약

먼저 광학 신호를 이용한 다양한 응용 분야에서의 핵심 요소인 광학 빔 조향 성능 향상을 위하여 실리콘 기반 격자 구조의 특성을 해석하였다. 이를 기반으로 높은 방사 효율과 좁은 빔 폭을 얻기 위해서 기존의 격자 구조 방사기에 분배 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector, DBR)를 집적한 구조를 제안한다. 분배 브래그 반사기의 위치에 따른 방사 효율과 방사 각도의 전치 반쪽을 분석하고 이를 토대로 최적화 구조를 제안한다. 제안한 격자 구조는 상보형 금속산화 반도체(complementary metal-oxide semiconductor, CMOS) 공정과 호환 가능하며, 최대 방사 효율 87.1% 및 최소 방사 각도의 반치 전폭 4.68°를 가진다.

ABSTRACT

We first numerically analyzed the characteristics of a silicon-based grating structure for beam steering. The analysis includes the basic principle of the grating structure according to the wavelength, peak radiation angle, radiation efficiency, and full-width at the half maximum(FWHM) of the radiation angle. Based on the analysis, we propose a silicon-based grating structure integrated with distributed Bragg reflector(DBR) to obtain a high radiation efficiency and narrow beam width simultaneously. We performed the numerical optimization of the radiation efficiency and FWHM of the radiation angle according to the DBR position. By the design optimization using the proposed grating structure compatible with the complementary metal-oxide semiconductor(CMOS) process, we achieved a maximum radiation efficiency of 87.1% and minimum FWHM of radiation angle of 4.68°.

키워드 : 실리콘 포토닉스, 빔 조향, 격자 구조, 분배 브래그 반사기

Key word : Silicon photonics, Beam steering, Grating structure, Distributed Bragg reflector

Received 26 February 2019, Revised 26 February 2019, Accepted 12 March 2019

* Corresponding Author Hyuk-Kee Sung(E-mail:hksung@hongik.ac.kr, Tel:+82-02-320-3037)

Associate Professor, School of Electrical and Electronics Engineering, Hongik University, Seoul, 04066, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.3.311>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

빔 조향은 빛을 자유공간 내의 다양한 방향으로 방사시킬 수 있는 기술이다. 최근 4차 산업 혁명을 맞이하여 빔 조향 기술을 이용한 다양한 광학 응용 기술들이 제안되고 있으며, 대표적 응용 분야로는 robust point-to-point free-space communication, Light Detection and Ranging(LIDAR), optical memory 기술들이 있다 [1, 2]. 특히 실리콘 기반 격자 구조를 이용한 빔 조향 기술은 Silicon On Insulator(SOI) 웨이퍼를 이용하므로 상보형 금속산화반도체(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS) 공정과 호환 가능하기 때문에 소형화, 저비용 및 대량 생산의 장점을 가지고 있으므로 다양하게 연구되어 오고 있다 [3, 4]. 빔 조향을 위한 격자 구조는 회절 현상을 이용하여 기존 도파로내에서 진행하는 빛을 방사시킨다 [5]. 그림 1은 2차원 빔 조향(2-dimensional beam steering)을 위한 배열 격자 구조의 개념도이다. 그림 1의 (a)는 단일 격자 구조에서 방사하는 빛의 방향을 나타낸다. 격자 구조 내로 입사하는 파장(λ)을 조절하면 격자 구조에서 방사하는 빛의 방사 진행 축 방향 방

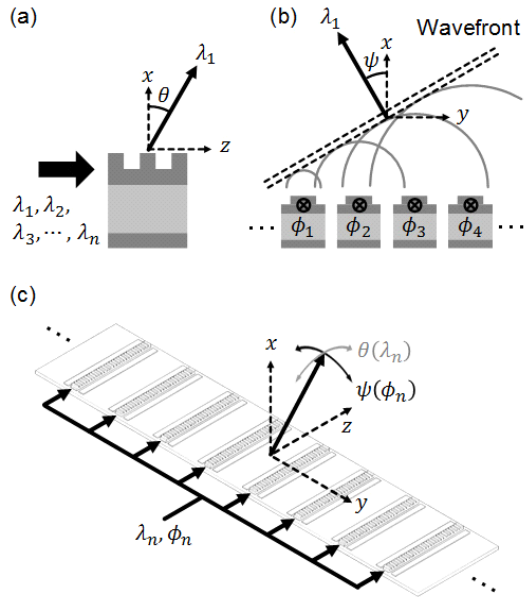


Fig. 1 Principle of optical beam steering using silicon-based grating structure. (a) Principle of 1-dimensional beam steering in the longitudinal θ axis. (b) transverse ψ axis. (c) 2-dimensional beam steering using arrayed grating structures.

사 각도(θ)를 변화시킬 수 있다. 그림1의 (b)는 격자 구조를 배열로 구성하였을 때 방사하는 방향을 나타낸다. 배열 격자 구조에 입사하는 빛의 위상(ϕ)을 각각 개별적으로 조절하면 격자 구조들에서 방사하는 빛들의 간섭 현상에 의해 빛의 진행방향 횡축으로 방사하는 각도(ψ)를 변화시킬 수 있다. 상기 그림 1의 (a)와 (b)에서의 방사 원리를 동시에 이용하여 배열 격자 구조에 입사하는 파장과 위상을 조절함으로써 2 차원 빔 조향을 획득할 수 있다. 이와 관련한 도식이 그림 1의 (c)에 나타나 있다.

빔 조향 성능에 관해서는 아래와 같이 두 가지 중요한 성능 지표를 들 수 있다. 첫 번째 지표는 빛의 손실이다. 격자 구조 내에서 회절 현상으로 인하여 빛이 방사할 격자의 아래 위 두 방향으로 진행한다. 즉 기판 하단 방향으로 진행 혹은 유실되는 빛이 필수불가결하게 존재하게 되며, 이는 빛의 목표 전달 방향을 기판 상단으로 보았을 때 손실로 작용하게 된다. 두 번째 지표는 원하는 특정 방사 각도로 정밀하게 빛을 조향하는 성능이다. 원하는 방사 조향 이외의 각도에서도 빛이 방사하게 되므로 목표 방사 각도 값을 기준으로 방사 각도의 반치전폭(Full width at Half Maximum, FWHM)을 최소화하여 좁은 빔 선폭을 얻는 것이 요구된다.

본 논문에서는 방사효율 증가 및 빔 선폭 감소를 동시에 달성하기 위한 이론적 근거, 새로운 구조 제안 및 분석 결과를 순서대로 제시한다. 먼저 단일 소자 실리콘 기반 격자 구조에 대하여 입사 파장에 따른 방사 진행 축 방향 방사 각도(θ)와 빔 조향 특성을 분석한다. 분석 내용을 기반으로 방사 효율 증가 및 빔 선폭 최소화를 달성하기 위하여 분배 브래그 반사(Distributed Bragg Reflector, DBR)가 집적된 실리콘 기반 격자 구조를 제안한다. 제안 구조에 대한 방사 효율 및 빔 조향 성능에 관한 수치 해석을 수행하며, 이를 통하여 분배 브래그 반사기가 집적된 격자 구조를 적용함으로써 빛 손실을 줄여 방사 효율을 최대화 할 수 있을 뿐 아니라 빛의 간섭 현상을 이용하여 방사 각도의 반치전폭을 최소화할 수 있음을 확인한다. 분석은 유한 요소 시간 영역(Finite-Difference Time-Domain, FDTD) 방법을 기반으로 수행되었다 [6, 7]. 제안하는 브래그 반사기 집적 형태의 광격자 구조는 향상된 빔 효율 및 조향각 성능을 가지므로 3D imaging, 정밀 광측정, 자유 공간 통신 등 다양한 분야에서의 핵심 소자로 이용될 수 있을 것이다.

II. 빔 조향용 실리콘 기반 격자 구조의 특성 분석

그림 2는 실리콘 기반 격자 구조의 개요도이다. 실리콘 기반 격자 구조는 실리콘(Si) 기판, 클래딩(SiO₂) 층, 격자(Si) 층으로 구성되며, 격자 층은 기존 도파로에서 식각(etching)을 이용하여 만들 수 있다. 수치 해석을 위하여 사용된 격자 구조 및 환경은 다음과 같다. 격자 구조 위는 자유 공간이며, 클래딩의 두께는 일반적으로 사용되는 2 μm, 기존 도파로와 같은 층인 격자 구조의 두께는 220 nm 이다. 기본 TE 모드로 진행하는 빛이 주기적인 유효 굴절률을 가지는 격자 구조에 입사하게 되면 회절 현상에 의하여 상하단 두 방향으로 각각 방사하게 된다. 그림 2에서 격자 구조 상단으로 방사하는 빛은 방사를 목표로 하는 방향으로의 진행 빛이며, 기판 하단으로 방사하는 빛은 손실로 작용하게 된다. 양 방향으로의 방사는 격자 구조를 통한 빛의 회절 현상에 근거하여 발생하며, 회절을 발생하기 위해서는 다음의 식 (1)로 표현되는 위상 정합 조건(phase matching condition)을 만족해야 한다 [5].

$$k_0 n_{eff} = k_0 n_0 \sin \theta + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

식 (1)에서 k_0 는 파수(=2π/λ, wave number), n_{eff} 는 격자구조의 유효 굴절률(effective refractive index), n_0 는 탑 클래딩의 굴절률(refractive index of top cladding), θ 는 방사 진행 축 방향을 기준으로 한 방사 각도(radiation angle), m 은 회절 차수(diffraction order), Λ

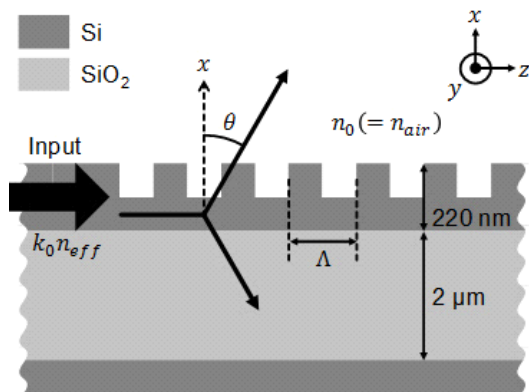


Fig. 2 Cross-sectional schematic of a silicon-based grating structure and corresponding beam radiation.

는 격자 주기(grating period)이다. 1차 회절 차수 ($m = 1$) 및 자유 공간 굴절률($n_0 = 1$)을 고려하여 식 (1)의 우변을 방사 각도에 대해 정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\theta(\lambda) = \sin^{-1} \left(\frac{n_{eff}(\lambda)\Lambda - \lambda}{\Lambda} \right) \quad (2)$$

식 (2)에 의하면 방사 각도는 격자 구조의 유효 굴절률, 격자 주기, 파장에 따라 변화하게 된다. 격자 구조에서 유효 굴절률과 격자 주기는 고정되므로, 파장을 변화시켜 빔 조향을 위한 빔 방사 각도 θ 를 조절할 수 있다.

그림 3은 파장과 최대 출력 방사 각도(peak radiation angle, θ_p)의 관계를 수치 해석한 결과이다. 최대 출력 방사 각도는 방사하는 빛의 세기가 최대가 되는 각도를 의미한다. 본 해석에서는 광통신용으로 주로 사용되는 1525-1625nm의 파장 범위에 대한 해석을 수행하였다. 격자 구조의 격자 주기는 680nm, 식각 두께는 100nm, 격자 개수는 30개를 적용하여 수치 해석을 하였다. 그림 3에서 보는 바와 같이 최대 출력 방사 각도는 1525nm의 파장에 대하여 21.18°이며, 이는 파장이 증가함에 따라 지속적으로 감소하여 1625nm 에서 8.8°의 값을 가지게 된다. 따라서 1525-1625nm 파장 범위에서는 빔 조향 각도를 8.8-21.18°로 제어할 수 있으며, 총 12.38°의 조향 범위를 달성할 수 있다. 또한 방사하는 빛은 최대 출력 방사 각도만 아니라 다른 방사 각도에서도 방사함을 확인할 수 있다.

그림 4는 그림 3을 얻기 위해 사용된 것과 동일한 격

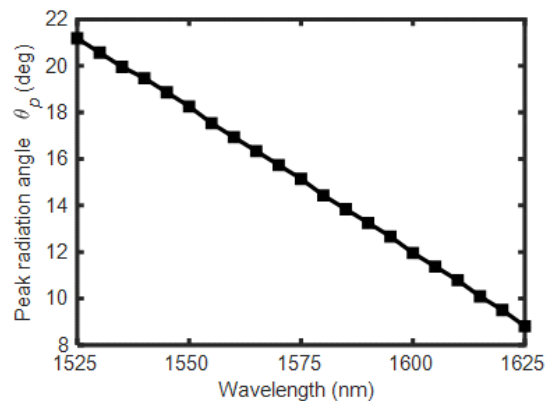


Fig. 3 Peak radiation angle θ_p as a function of wavelength in a single grating structure.

자 구조에 대하여 1575nm 파장에 대한 방사 각도 및 세기를 나타내었다. 방사하는 빛의 세기는 최대 출력 방사 각도에서 나온 빛의 세기를 기준으로 정규화하였다. 그림에서 보듯이 방사 각도가 15°일 때 방사하는 빛의 강도가 최대이며, 방사각이 최대 출력 방사 각도로부터 멀어질수록 빛의 세기는 감소하게 된다. 또한 최대 출력 방사각 기준으로 방사 세기가 3 dB 감소하는 방사 각도를 찾아냄으로써 방사 빔에 대한 반치 전폭 ($\delta\theta_{FWHM}$, full width half maximum, FWHM)을 구하여 방사 빔의 선폭 성능을 수치화할 수 있다. 그림 4에서 반치 전폭 값은 6.65°이다. 격자 구조를 이용한 빔 조향 응용에서는 방사되는 빛의 반치 전폭을 극소화함으로써 빔 조향의 정밀 제어를 달성할 수 있다.

그림 5는 파장에 따른 방사 효율과 방사 각 반치 전폭을 나타낸다. 방사 효율은 격자 구조에 입사하는 빛 세기 대비 격자 구조 상단 방향으로 방사하는 빛의 세기의 비율로 정의하였다. 격자 구조 하부 기판 방향으로 향하는 빛은 클래딩과 기판의 굴절률 차이에 의해 다시 상단으로 반사되고 이는 원래 상부 방향으로 방사되는 빛과 간섭을 일으키게 된다. 따라서 격자 구조 상부로 방사하는 빛과 격자 구조의 하부 기판으로 방사하는 빛과의 간섭현상의 강도 차이에 의해 방사 효율의 변화가 발생한다. 그림 5에서 보듯이 방사 효율은 파장 1525nm에서 55.3%이며, 파장 1625nm에서는 46.6%로 다소 감소하게 된다. 주어진 1525-1625nm의 파장 범위에서 방사 효율 값이 낮으므로 효과적인 빔 조향을 위해서는 방사 효율을 증가할 필요가 있음을 확인할 수 있다. 방사 각 반

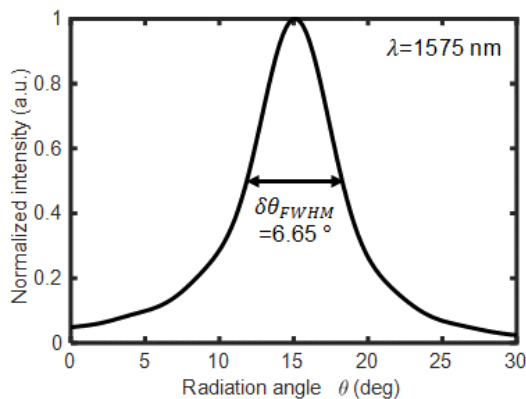


Fig. 4 Normalized intensity of a beam as a function of radiation angle at 1575-nm wavelength.

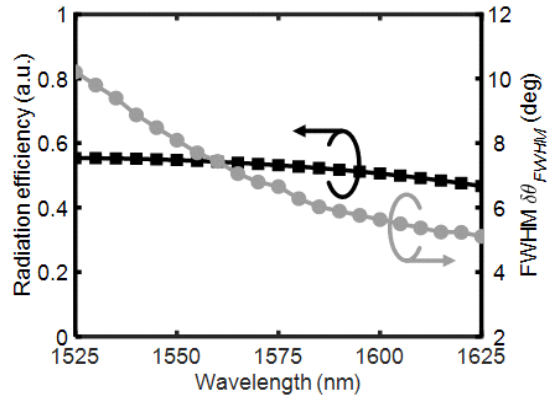


Fig. 5 Radiation efficiency(square maker) and FWHM ($\delta\theta_{FWHM}$, circle maker) as function of wavelength.

치 전폭 또한 파장에 따라 변화함을 알 수 있다. 1525nm 파장에서 10.2°의 방사 각 반치 전폭을 가지며, 1625 nm 파장에서 5.1°를 보여 파장이 증가함에 따라 반치 전폭은 감소함을 알 수 있다. 이는 파장이 증가에 따른 진행 거리에 대한 위상 변화율의 증가로 설명될 수 있다 [8]. 기존의 표준 격자 구조를 이용한 빔 조향 성능을 요약하면 최고 방사 효율은 55.3%, 방사 각 반치 전폭은 5.1°이다. 다음 절에서는 본 연구의 주목적인 방사 효율 향상 및 방사 각 반치 전폭 감소를 위한 새로운 구조 제안 및 이에 대한 성능 분석 결과를 제시한다.

III. 분배 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector, DBR) 집적 격자 구조에 대한 빔 조향 성능 분석

실리콘 도파로 기반의 격자 결합기의 주요 성능 지표 중 하나는 높은 결합 효율이다. 이를 위하여 격자 결합기 아래에 반사기를 추가하여 격자 구조 하부 기판으로 향하는 빛을 상부로 최대한 반사시키는 구조가 제안되었다. 본 저자의 최근 연구에서도 광 인터커넥트 분야의 응용을 위하여 분배 브래그 반사기가 집적된 고효율 격자 결합기를 제안하였다 [8]. 본 논문에서는 이를 기반으로 빔 조향 효율 및 방사 각 성능 향상을 동시에 달성하기 위하여 분배 브래그 반사기가 집적된 격자 구조를 제안한다. 그림 6은 분배 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector)가 집적된 실리콘 기반 격자 구조의 개

요도이다. 클래딩에는 두 단의 실리콘 층이 교대로 집적되어 있으며, 격자 구조와 분배 브래그 반사기 사이의 거리를 격자-DBR 거리(grating-DBR distance, D_R)라 정의한다. 클래딩에 집적된 두 단의 실리콘 층의 두께는 각각 100 nm 이며, 실리콘 층의 사이의 간격은 200 nm 이다. 클래딩 층에 두 단의 실리콘 층을 집적하여 만드는 분배 브래그 반사기(Distributed Bragg Reflector)는 실리콘과 실리카의 높은 굴절률 차이에 기인하여 두 단의 실리콘 층만으로도 높은 반사율을 얻을 수 있다 [9]. 제안 구조를 이용한 빔 조향 성능 향상의 핵심 요소는 다음과 같다. 제안 구조에서는 분배 브래그 반사기에 의해 추가적으로 상부로 향하는 반사빛이 존재하게 된다. 격자 구조 내 회절로 인하여 직접 상부로 향하는 빛과 브래그 반사기에 의해 반사되어 상부로 향하는 빛 사이의 간섭 현상을 최대화하면 빔 조향 효율 및 방사 각 성능 향상을 동시에 달성할 수 있다. 이는 격자-DBR 거리 D_R 의 최적화 값을 통하여 달성가능하다. 다시 말하면 격자 구조에서 상부로 방사하는 빛과 하부의 분배 브래그 반사기에 의해 반사되어 다시 상부로 향하는 빛이 간섭 현상을 일으킬 때, 동위상(in-phase)이면 보강 간섭(constitutive interference), 역위상(out-of-phase)이면 상쇄 간섭(destructive interference)이 발생하게 되는데, 격자-DBR 거리를 최적화함으로써 방사하는 빛의 세기 효율 및 방사 각 성능을 최대화할 수 있다.

그림 7은 격자-DBR 거리 D_R 의 변화에 따른 방사 효율 및 방사 각 전치 반폭을 나타낸다. 계산을 위하여 사용된 빛의 파장은 1575 nm 이다. 먼저 방사 효율에 대해

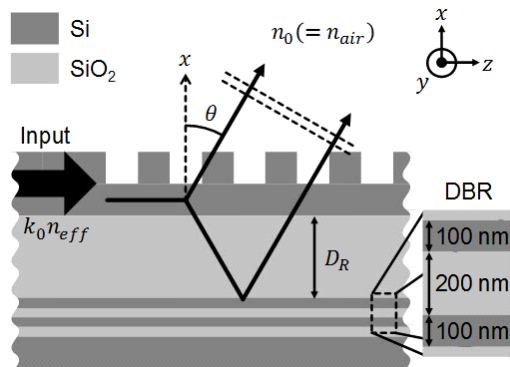


Fig. 6 Cross-sectional schematic of a silicon-based grating structure integrated with distributed Bragg reflector(DBR) layers.

여 살펴보면 격자-DBR 거리가 450, 1050, 1600nm인 경우 88.1, 88.7, 87.5%의 높은 방사 효율을 가지게 된다. 이는 격자 구조에서의 회절로 인해 직접 방사한 빛과 분배 브래그 반사기에 의해 반사한 빛이 동위상이 되는 경우에 대한 값들로서 주기성을 띤다. 방사 각 전치 반폭 값에 대하여 살펴보면 격자-DBR 거리가 250, 700, 1250, 1750nm 일 경우 4.3, 4, 3.9, 3.64°의 낮은 값의 방사 각 전치 반폭 값을 가지게 된다. 그 이유는 기존 격자 구조에서 회절 방사한 빛과 하부 분배 브래그 반사기를 통해 반사한 빛이 역위상 상쇄 간섭을 일으키기 때문이며, 결과로 낮은 방사 효율 및 좁은 방사 각 전치반폭을 가지게 된다. 위의 결과들을 종합하면 가장 높은 방사 효율을 가지는 격자-DBR 거리와 가장 좁은 방사 각 전치 반폭을 가지는 격자-DBR 거리는 동일하지 않다. 따라서 본 연구의 최종 결론으로 높은 방사 효율과 좁은 방사 각 전치 반폭을 동시에 달성하기 위하여 최적 격자-DBR 거리를 산출해 내었다. 구체적으로는 800, 1350, 1950nm 의 격자-DBR 거리에서 약 80%의 높은 방사 효율과 4~5°의 좁은 방사 각도의 반치 전폭을 얻을 수가 있음을 계산을 통하여 알아내었다.

그림 8은 격자-DBR 거리 D_R 의 최적화 값이 적용된 방사 효율 및 방사 각 반치 전폭 성능을 나타낸다. 최적화된 분배 브래그 반사기와 격자 거리는 800 nm 이며, 동일한 조건에서 분석된 분배 브래그 반사기가 존재하지 않는 경우와의 결과 값을 비교하면 다음과 같다 (그림 5). 분배 브래그 반사기의 집적 유무에 따라서 방사 효율은 1525nm 파장에서 55.3%에서 87.1%로 증가하

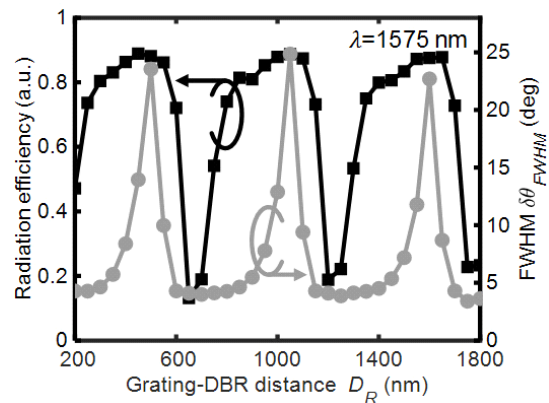


Fig. 7 Radiation efficiency(square maker) and FWHM ($\delta\theta_{FWHM}$, circle maker) as function of grating-DBR distance(D_R) of a grating structure integrated with DBR.

계 되어 방사효율을 21.8% 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 방사 각도의 반치 전폭은 1525nm 파장에서 10.2°서 4.68°만큼 감소하여, 기존 대비 45.8%로 줄어들게 된다. 따라서 기존의 격자 구조에 대하여 분배 브래그 구조를 적용하고, 격자-DBR 거리 D_R 를 최적화함으로써 빔 조향의 크기 효율 및 방사 각 성능 향상을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결론

광학 빔 조향 성능 향상을 위해 기존의 실리콘 기반 격자 구조에 대하여 하부 분배 브래그 반사기 집적화를 제안하며, 제안 구조에 대한 방사 효율 성능 및 빔 조향 각 성능을 수치 해석하였다. 격자 구조와 분배 브래그 반사기 사이의 거리인 격자-DBR 거리가 제안구조의 성능 최적화에 있어 핵심 조절 인자임을 확인하였다. 제안 구조 및 격자-DBR 거리 최적화를 도입하여 분배 브래그 반사기가 없는 경우와 비교하여 1525-1625nm 사이의 전 파장에 대하여 방사 효율 증가를 이루었으며, 일정한 값을 가진 좁은 방사 각 전치 반폭을 얻을 수 있으므로 확인하였다. 제안된 격자 구조는 CMOS 공정과 호환가능 하도록 설계되었으므로 다양한 분야에서 응용 잠재력을 가진 광학 빔 조향기의 저비용, 소형화, 고성능화에 기여할 것이다.

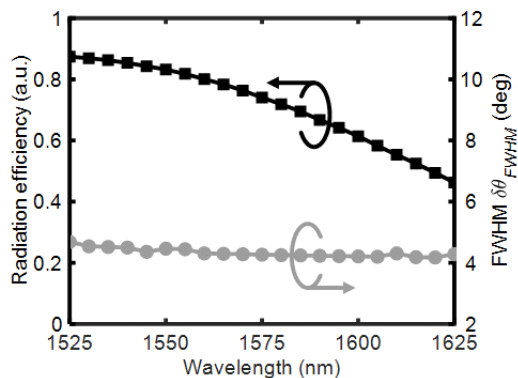


Fig. 8 Radiation efficiency(square maker) and FWHM ($\Delta\theta_{FWHM}$ circle maker) as function of wavelength fixed D_R is 800 nm.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) under the Basic Science Research Program(No. NRF-2016R1D1A1B03931971), and in part by the Korea Electric Power Corporation (No. R17XA05-74).

REFERENCES

- [1] C. V. Poulton, A. Yaacobi, D. B. Cole, M. J. Byrd, M. Raval, D. Vermeulen, and M. R. Watts, "Coherent solid-state LIDAR with silicon photonic optical phased arrays," *Optics Letters*, vol. 42, no. 20, pp. 4091-4094, Oct. 2017.
- [2] S. Chung, H. Abediasl, and H. Hashemi, "A Monolithically Integrated Large-Scale Optical Phased Array in Silicon-on-Insulator CMOS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 1, pp. 275-296, Jan. 2018.
- [3] K. V. Acoleyen, W. Bogaerts, J. Jagerska, N. L. Thomas, R. Houdre, and R. Baets, "Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-on-insulator," *Optics Letters*, vol. 34, no. 9, pp. 1477-1479, May 2009.
- [4] A. Rahim, E. Ryckeboer, A. Z. Subramanian, S. Clemmen, B. Kuyken, A. Dhakal, A. Raza, A. Hermans, M. Muneeb, S. Dhoore, Y. Li, U. Dave, P. Bienstman, N. Le Thomas, G. Roelkens, D. Van Thourhout, P. Helin, S. Severi, X. Rottenberg, and R. Baets, "Expanding the Silicon Photonics Portfolio With Silicon Nitride Photonic Integrated Circuits," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 4, pp. 639-649, Feb. 2017.
- [5] T. Tamir, and S. T. Peng, "Analysis and design of grating couplers," *Journal of Applied Physics*, vol. 14, no. 3, pp. 235-254, Nov. 1977.
- [6] D. Taillaert, W. Bogaerts, P. Bienstman, T. F. Krauss, P. Van Daele, I. Moerman, S. Verstuyft, K. De Mesel, and R. Baets, "An out-of-plane grating coupler for efficient butt-coupling between compact planar waveguides and single-mode fibers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 7, pp. 949-955, Jul. 2002.
- [7] A. Taflove, and S. C. Hagness, "Periodic Structure," in *Computational Electrodynamics*, 3rd ed. Norwood, MA, USA: Artech house inc., 2005, ch. 13, pp. 553-605.
- [8] Y. S. Hong, C. H. Cho, and H. K. Sung, "Theoretical analysis of simultaneously improving the light coupling

efficiency and bandwidth between two separated grating couplers using integrated distributed Bragg reflectors,” *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 71, no. 10, pp. 647-651, Nov. 2017.

[9] M. Cho, J. H. Seo, J. Lee, D. Zhao, H. Mi, X. Yin, M. Kim, X. Wang, W. Zhou, and Z. Ma, “Ultra-thin distributed Bragg reflectors via stacked single-crystal silicon nanomembranes,” *Applied Physics Letters*, vol. 106, no. 18, pp. 181107, May 2015.



홍유승(Yoo-Seung Hong)

2014년 02월 홍익대학교 전자전기공학부 공학학사
2016년 08월 홍익대학교 전자정보통신공학부 공학석사
2018년 07월 홍익대학교 과학기술연구소 연구원
※관심분야: 실리콘 포토닉스, 실리콘 광, 광 인터커넥트.



조준형(Jun-Hyung Cho)

2011년 02월 홍익대학교 전자전기공학부 공학학사
2013년 02월 홍익대학교 전자정보통신공학과 공학석사
2018년 02월 홍익대학교 전자정보통신공학과 공학박사
2018년 03월 - 홍익대학교 과학기술연구소 Pos-Doc
※관심분야: 반도체 레이저 고속 변조, 광 주입 잠금, 광전 발진기



성혁기(Hyuk-Kee Sung)

1999년 연세대학교 전자공학과 공학학사
2006년 08월 Ph.D, EECS University of California, Berkeley
2007년 09월 - 홍익대학교 전자전기공학부 부교수
※관심분야: 광소자, 반도체 레이저, 광 바이오 센서