## 変調サブ波長周期電極を用いた 集光機能を有する発光ダイオードの理論的検討 Theoretical analysis of light emitting diode with focusing characteristic by using modulated sub-wavelength periodic electrodes 徳島大理エ<sup>1</sup>, 徳島大 pLED<sup>2</sup><sup>O</sup>(B)大下悠<sup>1</sup>, 高島祐介<sup>1</sup>, 原口雅宣<sup>1,2</sup>, 直井美貴<sup>1,2</sup> Haruka Oshita<sup>1</sup>, Yuusuke Takashima<sup>1</sup>, Masanobu Haraguchi<sup>1,2</sup>, and Yoshiki Naoi<sup>1,2</sup> <sup>1</sup>Faculty of Sci. and Tech., Tokushima Univ. <sup>2</sup>Institute of Post-LED Photonics, Tokushima Univ. E-mail:h.oshita@ee.tokushima-u.ac.jp

紫外 LED (Light Emitting Diode) は、IoT 社会実現に向け て大きな役割を期待されている。例えば集光機能を有す る紫外 LED は、小型殺菌デバイスとして応用が可能であ る。従来のレンズ透過率は波長 400 ~ 500 nm において 10 %程度[1]であり、これは材料の大きな吸収係数のため である。今回我々は LED 表面にサブ波長周期電極 (SWPE: Subwavelength periodic electrodes) を用いた高透 過率の集光 LED を検討したので報告する。

SWPEは入射波長 $\lambda$ より短い周期 $\Lambda$ で並ぶ電極であり、 構造寸法や周期的な屈折率分布で決まる光の状態(固有 モード)が存在する。SWPE表面から距離f離れた点にお ける輻射光の位相 $\emptyset$ は式(1)で表される[2,3]。

$$\phi(x) = \frac{2\pi}{\lambda} \left( f + \frac{\phi_{mode}}{2\pi} - \sqrt{x_1^2 + f^2} \right) \quad (1)$$

式(1)と固有モードの波数分散関係[4]を用い、任意の1点 で $Ø = 2\pi n / \lambda$  (n:整数)となるよう位相を設計すれば輻 射光を集光できる。なお伝搬光の初期位相 (SWPE 表面に おける位相)は $\Lambda / \lambda$ と高さ $t_g$ により決まる。また SWPE 材料が高屈折率の場合、低屈折率である空隙部で固有モー ドが強め合うよう SWPE 格子幅すなわち屈折率分布を変 調すれば、材料吸収の大小によらない高透過率が得られる。

本研究での設計モデルを Fig. 1 に示す。下層は Ni、上層は Ge、Si、SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>を検討した。入射波長 405 nm に対し構造周期  $\Lambda$  = 200 nm、高さ t<sub>g</sub> = 50 nm とし、SWPE 表面から 20  $\mu$ m で位相が強め合うよう構造幅は中心 w = 100 nm、位相差を設けるために外側へ 5 nm ずつ変調し、最外幅は 55 nm とした。本構造に SWPE 周期方向に対し直交するような電界の平面波を垂直に入射した。

Ge/Ni-SWPE の電場分布を Fig. 2 に、透過率と集光



Tab.1 Light intensity of the transmitted light through SWPE

Material [refractive index]	Light intensity on the focal point	FWHM
Ge[4.1185+i2.1884]	23.60%	1.4µm
Si[4.3124+i2.1358]	23.46%	1.4µm
SiO <sub>2</sub> [1.4696]	31.41%	1.5µm
TiO <sub>2</sub> [2.3258]	29.25%	1.4µm

FWHM を Tab.1 に示す。Figure 2 より電場は歪んでおり  $z = 20 \mu m$  で1 か所に集まっている。Table 1 において集光域の FWHM を比較すると、高屈折率材料 Ge、Si、TiO<sub>2</sub>を用いることにより集光域 を 0.1  $\mu m$  小さくできることがわかった。この結果に対して、空隙部との屈折率差と SWPE 変調に よる屈折率差により大きく位相差を見出せば、より微小域に集光できることがわかる。また屈折 率虚部が大きいと光吸収も大きいが、Ge と Si を比較すると虚部の大きい Ge の方が 0.6 %透過率 が高い。この結果は格子幅の変調により Ge/Ni-SWPE 固有モードのエネルギーが空隙部に集中し たため得られたと考える。以上から、LED 表面の変調 SWPE を用いて、材料に光吸収があっても 高い透過率を有する集光特性を LED に持たすことが可能であるとわかった。

**謝辞**:本研究の一部は JSPS 科研費 JP18K04238 および徳島大学 LED 総合プラットフォーム事業の 助成を受けたものです。

参考文献:[1] K. H. Li *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 051107 (2014). [2] F. Lu *et al.*, Opt. Express **18**, 12606 (2010). [3] Z. Wang *et al.*, Opt. Commun. **367**, 144 (2016). [4] C. J. C. Hasnain and W. Yang, Adv. Opt. Photonics **4**, 379 (2012).