

## Интерференция лазерных пучков в массивах СС-VCSEL

Винницкий национальный технический университет

### Аннотация

*Исследованы модели формирования полей многолучевых интерференционных картин лазерных пучков для применения в лазерных массивах с вертикально связанными оптическими резонаторами СС-VCSEL*

**Ключевые слова:** Интерференция, лазерный массив, СС-VCSEL

### Abstract

*The models of the formation of the fields of multipath interference patterns of laser beams for use in laser arrays with vertically coupled optical resonators SS-VCSEL*

**Keywords:** Interference, laser array. СС-VCSEL

Одним из перспективных направлений в области оптоэлектронных вычислительных устройств и высокоскоростных систем передачи данных является разработка модифицированных вертикальных лазерных диодов со связанными резонаторами (СС-VCSEL) [1-2].

В отличие от традиционных вертикальных лазеров (VCSEL) в структурах СС-VCSEL сегодня реализованы режимы одночастотной (с приемлемой для оптических систем передачи мощностью) и двухчастотной генерации, получена возможность управления поляризацией и длиной волны излучения за счет малозначительного изменения соотношения токов накачки связанных резонаторов [2-3].

Одним из важных применений технологии СС-VCSEL является разработка управляемых интегрированных фазово-синхронизированных массивов излучателей нового типа, ячейки которого способны выполнять функции оптических логических элементов при пространственной интерференции  $L$ - и  $S$ - мод излучения в границах соответствующих дифракционных структур [3].

Математическая модель суммарного поля при интерференции  $i$  монохроматических направленных световых пучков в приближении плоских электромагнитных волн имеет вид:

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}, t) &= \vec{E}_1 \sin(\omega t - \vec{k}_1 \vec{r} + \varphi_1^0) + \vec{E}_2 \sin(\omega t - \vec{k}_2 \vec{r} + \varphi_2^0) + \dots = \\ &= \sum_i \vec{E}_i \sin(\omega t - \vec{k}_i \vec{r} + \varphi_i^0), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\omega$  - частота,  $\vec{k}$  - волновой вектор,  $\varphi^0$  - начальная фаза.

При сложении двух пучков под углом  $2\theta$  результирующая картина интенсивности будет промодулирована в пространстве по периодическому закону. В местах, где разница фаз кратна  $2\pi$ , амплитуды напряженностей поля складываются, образуя относительно яркие световые полосы (световые колебания усиливаются в области интерференционных максимумов). Расстояние между соседними полосами (период интерференционной картины) при интерференции двух лазерных пучков:

$$(\vec{k}_1 - \vec{k}_2) \vec{L} = 2\pi. \quad (2)$$

Таким образом, период интерференционной картины двух сходящихся под углом  $2\theta$  пучков, равен

$$L = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  - длина волны лазера.

Суммарная напряженность электрического поля в плоскости изображения  $(x, y)$ , нормальной к плоскости сечения лазерных пучков, может быть представлена в виде суперпозиции плоских волн:

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n E_{0i} \exp(-ik \sin \alpha_i (x \cos \beta_i - y \sin \beta_i)), \quad (4)$$

где  $\alpha_i$  - угол между волновым вектором пучка и нормалью к плоскости  $(x, y)$ ,  $\beta_i$  - угол между проекцией волнового вектора  $i$ -го пучка на плоскость  $(x, y)$ .

В случае общеизвестной двухлучевой интерференции ( $i=2$ ) образуется классическая одномерная картина.

При этом интенсивность интерференционной картины ( $E_{01}=E_{02}=E_0$ ,  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha$ ,  $\beta_1=0$ ,  $\beta_2=\pi$ )

$$I = |E_0^2| = 4E_0^2 \cos^2(kx \sin \alpha), \quad (5)$$

Для трехпучковой интерференции с учетом ( $E_{01}=E_{02}=E_{03}=E_0$ ,  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha$ ,  $\beta_1=0$ ,  $\beta_2=2\pi/3$ ,  $\beta_3=-2\pi/3$ ) [4]:

$$I = E_0^2 \left\{ \left[ -\cos(kx \sin \alpha) - \cos(k \sin \alpha (-\frac{x}{2} - \frac{y\sqrt{3}}{2})) - \cos(k \sin \alpha (-\frac{x}{2} + \frac{y\sqrt{3}}{2})) \right]^2 + \left[ -\sin(kx \sin \alpha) + \sin(k \sin \alpha (-\frac{x}{2} - \frac{y\sqrt{3}}{2})) - \sin(k \sin \alpha (-\frac{x}{2} + \frac{y\sqrt{3}}{2})) \right]^2 \right\} \quad (5)$$

При использовании двумерной решетки  $m \times n$  суммарная 3D интерференционная картина при использовании одинаковых лазерных пучков с одинаковой начальной фазой [5]:

$$I(x, y, z) = I_0(z) \left\{ \frac{\sin \frac{mkx}{2\eta_x} + m\delta\varphi_x}{\sin \frac{kx}{2\eta_x} + \delta\varphi_x} \cdot \frac{\sin \frac{mky}{2\eta_y} + m\delta\varphi_y}{\sin \frac{kx}{2\eta_y} + \delta\varphi_y} \right\}, \quad (6)$$

где  $d_x, d_y$  - периоды решеток (расстояние между лазерами) по осям  $x$  и  $y$ , соответственно,

$\eta_x = z/d_x$ ,  $\eta_y = z/d_y$  - приведенные координаты,  $\delta\varphi_x, \delta\varphi_y$  - постоянная разность фаз по осям  $x$  и  $y$ ,

$I_0(z) = \frac{2P_0}{\pi W^2(z)}$ ,  $P_0$  - мощность каждого из лазеров,  $W(z)$  - функция распределения пучка по  $z$ .

Преимуществом многопучковой интерференции может быть более высокая интенсивность света в максимумах ( $I_{\max} \propto n^2 P_0$ ), что позволяет использовать пучки с пороговыми значениями интенсивности лазерных мод в структурах *CC-VSCEL*.

Таким образом, использование многолучевой интерференции на структурах лазерных массивов СС-VCSEL позволит расширить диапазон применений таких устройств для параллельных вычислительных устройств, в частности специализированных арифметических спецпроцессоров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысенко Г. Л. Фотонные Логические элементы на основе фазово-синхронизированных массивов СС-VCSEL / Г. Л. Лысенко, С. Е. Тужанский, М. Альравшдех // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2013. - № 2(26). - С. 42-47.
2. Koyama Fumio. Recent Advances of VCSEL Photonics // Journal of Lightwave Technology. – 2006, Vol. 24, No. 12, pp. 4502-4515.
3. Zujewski M. Coupled-cavity surface-emitting lasers: spectral and polarization threshold characteristics and electrooptic switching/ M. Zujewski, H. Thienpont, K. Panajotov // Optics Express. – 2010. Vol. 18, No.26, pp. 525-533.
4. Lasagni A. Periodic pattern formation of intermetallic phases with long range order by laser interference metallurgy / A. Lasagni, C. Holzapfer, F. Mucklich // - Advanced Eng. Mat. – 2005. – V.7, N.6. – P.487-492.
5. Венгер С.Ф. Лазер-індуковані наноструктури у твердих тілах / С.Ф. Венгер, О.Ю. Семчук, О.О. Гаврилюк. – К.: Академмістечко, 2016. – 236 с.

*Лысенко Геннадий Леонидович* – к.т.н., профессор, профессор кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, Винница

*Тужанский Станислав Евгеньевич* – к.т.н., доцент кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, Винница

*Медин Мохамед А. Альравашди* – соискатель кафедры лазерной и оптикоэлектронной техники, Винницкий национальный технический университет, Винница