

DOI: 10.24143/2072-9502-2019-3-44-52
УДК 535.3

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ УПРАВЛЯЕМОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ НА ОСНОВЕ НИОБАТА ЛИТИЯ

К. А. Вытовтов, Е. А. Барабанова, М. А. Игумнов

*Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Российская Федерация*

Перспективным направлением для высокоскоростной передачи сигнала в беспроводных системах оптической связи является использование оптических антенн. В отличие от волоконно-оптических систем, достаточно развитых на сегодняшний день, на оптическую антенную решетку в настоящее время представлены только один патент и одна работа, описывающая оптическую антенную решетку для передачи оптического сигнала в телекоммуникационных сетях. Важной задачей в создании антенны является выбор интеллектуального материала для управления диаграммой направленности. В работе представлены физические основы построения оптической антенной решетки. Представленная антенная решетка основывается на системе зеркал и системе линз. Для обеспечения необходимого фазового сдвига предлагается два вида структур: на основе ниобата лития и на основе феррита-граната. Впервые найдены основные аналитические выражения, описывающие поведение системы.

Ключевые слова: оптическая антенна, диаграмма направленности, система линз, фазовращатель, ниобат лития.

Для цитирования: *Вытовтов К. А., Барабанова Е. А., Игумнов М. А.* Физические основы построения управляемой оптической антенны на основе ниобата лития // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. С. 44–52. DOI: 10.24143/2072-9502-2019-3-44-52.

Введение

В настоящее время оптические системы являются перспективными видами передачи информации в телекоммуникационных структурах благодаря высокой скорости передачи информации [1–10]. Существует два основных направления развития оптических систем: беспроводное [1–4] и волоконно-оптическое [5]. Волоконно-оптические системы достаточно развиты на сегодняшний день, чего нельзя сказать о беспроводных оптических системах. В частности, был представлен только один патент на оптическую антенную решетку [4], несмотря на то, что данное устройство очень важно в линиях связи. Очевидно, что оптические антенны должны использоваться в беспроводных системах оптической связи для высокоскоростной передачи сигнала.

В современной технологии оптические антенны используются только для увеличения поперечных сечений поглощения и квантовых выходов в фотовольтаике, эффективного высвобождения энергии из наноразмерных светоизлучающих устройств, повышения эффективности фотохимических или фотофизических детекторов и увеличения пространственного разрешения в оптической микроскопии [6, 9]. Также в цифровые микросхемы встроена оптическая антенно-светодиодная структура, позволяющая им быстрее передавать информацию и увеличивать вычислительную мощность [6, 10]. Такие антенны называются оптическими наноантеннами. Подробное описание наноантенн можно найти в [6]. В этой работе также приводится классификация оптических наноантенн.

Тем не менее, существует только одна работа, описывающая оптическую антенную решетку для передачи оптического сигнала в телекоммуникационных сетях [4]. Эта антенна была построена как открытый выход оптического кабеля. Каждый выход кабеля рассматривался как элемент антенной решетки. Основным недостатком этой антенны является ее неуправляемость. Кроме того, в [4] не были представлены результаты расчетов мощности системы.

Важной проблемой в области исследования оптических антенн является применение так называемых умных материалов, которые позволяют управлять диаграммой направленности антенны. Такие материалы описаны, например, в [11, 12].

В нашей работе представлена управляемая оптическая антенная решетка, которую можно спроектировать с помощью известных оптических материалов без наноструктуры. Очень важным направлением в создании антенны является выбор интеллектуального материала для управления диаграммой направленности, представлены варианты решения данной проблемы.

Принцип работы оптической антенны

Структура разработанной оптической антенной решетки представлена на рис. 1.

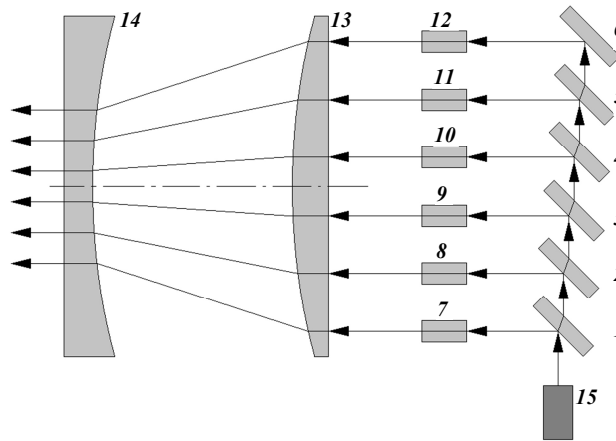


Рис. 1. Структура оптической антенной решетки: 1–5 – полупрозрачные зеркала; 6 – полностью отражающее зеркало; 7–12 – фазовращатели; 13 – собирающая линза; 14 – рассеивающая линза; 15 – лазер

Антенная решетка состоит из полупрозрачных зеркал 1–5, абсолютно отражающего зеркала 6, оптических фазовращателей 7–12, собирающей линзы 13, рассеивающей линзы 14, лазера 15. Луч света от лазера 15 поступает на делитель мощности (система зеркал 1–6). Эта система делит энергию на 6 равных частей. Отраженные от зеркал лучи поступают на фазовращатели 7–12, которые компенсируют фазовый сдвиг за счет разности хода лучей и обеспечивают дополнительный фазовый сдвиг для управления диаграммой направленности оптической антенной решетки. Затем лучи поступают на собирающую линзу 13, которая служит для фокусировки лучей на выходе антенны. Действительно, для эффективного формирования пучка расстояние между пучками должно быть соизмеримо с длиной волны, но для эффективной обработки сигнала предыдущие устройства имеют гораздо больший размер. Рассеивающая линза 14 служит для формирования параллельного пучка лучей на выходе антенны. Кроме того, внешняя поверхность рассеивающей линзы может представлять собой двумерную дифракционную решетку из прозрачных отверстий, что позволяет сформировать нужную диаграмму направленности.

В рассматриваемой антенной решетке лазерный луч можно разделить на четное и нечетное количество лучей. Ранее в теории фазированных антенных решеток было показано, что использование более 7 лучей нецелесообразно, т. к. дальнейшее увеличение излучателей практически не приводит к сужению диаграммы направленности. В последующих разделах будут подробно представлены компоненты антенны.

Система зеркал

Излучение лазерного источника 15 падает на полупрозрачное зеркало 1 с коэффициентом отражения мощности $R_1 = 1/N$, где N – номер выхода антенной решетки (в данном случае $R_1 = 1/6 = 0,167$). Часть мощности, равная $T_2 = (N - 1)/N$, поступает на полупрозрачное зеркало 2, а часть, равная $R_1 = 1/N$ (в данном случае $1/6 = 0,167$), поступает на фазовращатель 7. Коэффициент отражения зеркала 2 равен $R_2 = 1/(N - 1)$ (в данном случае $1/5 = 0,2$). Луч с этой долей мощности ($T_1 R_2 = 1/N$) поступает на фазовращатель 8. То есть такая же мощность сигналов поступает на фазовращатели 6 и 7. Часть мощности $(N - 2)/N$ (в данном случае $4/6 = 2/3 = 0,6(6)$) от общей мощности переходит на зеркало 3 и т. д. Зеркало 3 имеет коэффициент отражения

$R_3 = 1/(N - 2)$ (в данном случае $R_3 = 1/4 = 0,25$). Аналогично $R_4 = 1/(N - 3)$, $R_5 = 1/(N - 4)$, $R_6 = 1/(N - 5)$ и т. д. Коэффициент отражения последнего зеркала равен единице (в данном случае $R_6 = 1/(N - 5) = 1/(6 - 5) = 1$). Как видно из описания, в общем случае коэффициент отражения i -го зеркала равен

$$R_i = \frac{1}{N - i + 1},$$

коэффициент прохождения равен

$$T_i = 1 - \frac{1}{N - i + 1} = \frac{N - i}{N - i + 1}.$$

Таким образом, мощность излучения в зеркальной системе делится поровну, затем пучки подаются на соответствующие фазовращатели 7–12. Зеркала должны иметь малые потери и малую частотную дисперсию в рабочей области длин волн $1\ 550 \pm 100$ нм. Такое свойство можно получить, используя неоднородные диэлектрические структуры. В практическом применении для изготовления таких зеркал можно использовать аморфное стекло.

Фазовращатель

Фазовращатели должны компенсировать фазовые сдвиги из-за разницы хода лучей по разным N траекториям и ввести дополнительный фазовый сдвиг для управления направлением основного лепестка диаграммы направленности антенны.

Разница прохождения лучей, обусловленная распространением через каждое полупрозрачное зеркало, равна

$$a = d \cos \alpha \sqrt{\frac{k_0^2 \sin^2 \alpha}{k^2 - k_0^2 \sin^2 \alpha}},$$

где

$$k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0};$$

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0},$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; d – толщина предыдущего зеркала; α – угол падения луча на зеркало; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость зеркала; μ – относительная магнитная проницаемость зеркала. Таким образом, для i -го зеркала имеем

$$a_{i \text{ зеркало}} = (i - 1) \frac{dk_0 \cos \alpha \sin \alpha}{\sqrt{k^2 - k_0^2 \sin^2 \alpha}}.$$

Таким образом, фазовый сдвиг для i -го зеркала

$$\Delta_{i \text{ зеркало}} = (i - 1) \frac{dk_0^2 \cos \alpha \sin \alpha}{\sqrt{k^2 - k_0^2 \sin^2 \alpha}}.$$

Разность хода лучей из-за сходимости лучей между собирающей и рассеивающей линзами с четным числом лучей

$$a_{n \text{ линза}} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(2n - 1)^2 (b_1 - b_2)^2 + 4b_n^2} - \sqrt{(b_1 - b_2)^2 + 4b_1^2} \right],$$

где b_1 – расстояние между лучами на выходе сходящейся линзы; b_2 – расстояние между лучами на входе расходящейся линзы; b_n – расстояние между линзами с учетом кривизны их поверхностей и смещения луча. Здесь номер луча отсчитывается от оптической оси в обоих направлениях. Тогда фазовый сдвиг для n -го луча равен

$$\Delta_n \text{ линза} = \frac{k_0}{2} \left[\sqrt{(2n-1)^2 (b_1 - b_2)^2 + 4b_i^2} - \sqrt{(b_1 - b_2)^2 + 4b_1^2} \right].$$

Разность траекторий, обусловленная сходимостью лучей между собирающей и рассеивающей линзами и соответствующим фазовым сдвигом с нечетным числом лучей, равна

$$a_n \text{ линза} = \sqrt{(n-1)^2 (b_1 - b_2)^2 + b_n^2} - b_1;$$

$$\Delta_n \text{ линза} = k_0 \left[\sqrt{(n-1)^2 (b_1 - b_2)^2 + b_n^2} - b_1 \right].$$

Дополнительный фазовый сдвиг существует также в линзах и зависит от толщины линз в точке прохождения луча и материальных параметров линзы:

$$\Delta_n \text{ собирающая} = k_{\text{собирающая}} (y_n \text{ собирающая} - y_1 \text{ собирающая});$$

$$\Delta_n \text{ рассеивающая} = k_{\text{рассеивающая}} (y_n \text{ рассеивающая} - y_1 \text{ рассеивающая}),$$

где

$$k_{\text{собирающая}} = \omega \sqrt{\varepsilon_{\text{собирающая}} \varepsilon_0 \mu_{\text{собирающая}} \mu_0};$$

$$k_{\text{рассеивающая}} = \omega \sqrt{\varepsilon_{\text{рассеивающая}} \varepsilon_0 \mu_{\text{рассеивающая}} \mu_0}.$$

Распространение волн в собирающих и рассеивающих линзах является одинаковым (y_n собирающая = y_n рассеивающая), а толщина линз в точках прохождения n -го луча определяется кривизной поверхности линзы.

Что касается дополнительного фазового сдвига для управления диаграммой направленности антенны, то для этого необходимо использовать интеллектуальные материалы. Параметры таких материалов зависят от величины внешнего управляющего сигнала. Сегодня в оптике известно лишь несколько таких материалов. Например, это ниобат лития, показатель преломления которого зависит от величины внешнего приложенного напряжения, и феррит-гранат, параметры которого определяются величиной внешнего магнитного поля.

Феррит-гранат является управляемым (магнитооптическим) материалом в оптическом диапазоне. Зависимость оптической мощности от величины магнитного поля (рис. 2) была изучена, например, в [11].

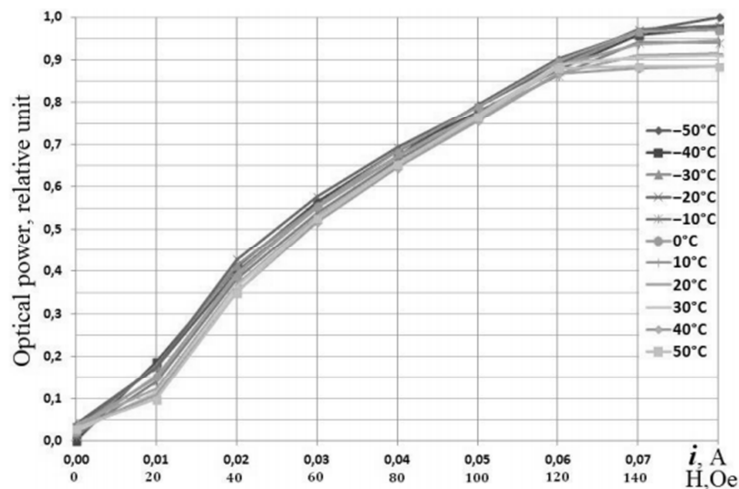


Рис. 2. Зависимость иттрий-железного граната от магнитного поля [11]

Зависимость показателей преломления ниобата лития при длине волны 1 581,9 нм представлена на рис. 3.

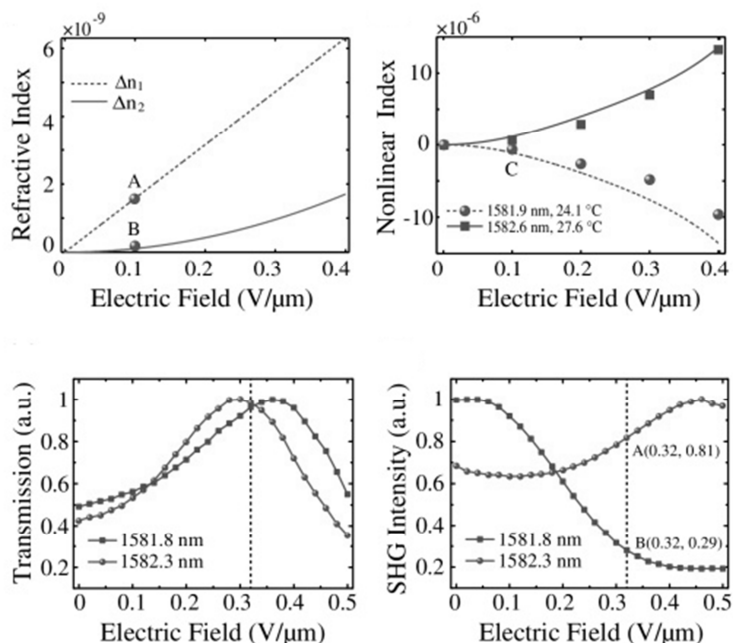


Рис. 3. Зависимости LiNbO₃ от электрического поля [12]

Из рис. 3 видно, что зависимость показателя преломления от величины внешнего магнитного поля очень слабая.

Рассмотрим детальнее физические основы управления фазовым сдвигом ниобата лития.

Управление осуществляется с использованием электрооптических эффектов, т. е. эффектов изменения коэффициентов преломления посредством изменения электрического поля. В основе электрического управления лежат эффекты Поккельса и Керра. Оба они описывают зависимость коэффициента преломления от внешнего электрического поля. В данном устройстве используется только эффект Поккельса, при котором зависимость коэффициента преломления от напряженности поля наиболее часто описывается разложением в ряд Тейлора

$$n = n_0 + a_1 E + a_2 E^2 + a_3 E^3 + \dots, \quad (1)$$

где для первых двух слагаемых имеем

$$n_0 = n(E)|_{E=0}; \quad a_1 = \left. \frac{\partial n}{\partial E} \right|_{E=0}; \quad a_2 = \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 n}{\partial E^2} \right|_{E=0}.$$

Далее введем два новых коэффициента:

$$r = -\frac{2a_1}{n_0^3}; \quad \zeta = -\frac{a_2}{n_0^3}.$$

Тогда вместо (1) запишем

$$n = n_0 - \frac{1}{2} r n^3 E - \frac{1}{2} \zeta n^3 E^2 + \dots$$

Если пренебречь третьим слагаемым в сравнении со вторым, получим

$$n = n_0 - \frac{1}{2} r n_0^3 E .$$

Это соотношение описывает так называемый линейный эффект Поккельса. Здесь r называется коэффициентом Поккельса, или линейным электрооптическим коэффициентом. Типовые значения линейного электрооптического коэффициента для реальных материалов находятся в пределах 10^{-12} – 10^{-10} м/В, при этом изменение коэффициента преломления также будет очень маленьким. Так, для $E = 10^6$ В/м получаем $\Delta n = 10^{-6}$ – 10^{-4} . Самыми распространенными материалами, использующими эффект Поккельса, являются $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KH_2PO_4 , LiNbO_3 , LiTaO_3 и CdTe .

Теперь, учитывая известное соотношение $E = U/d$, где U – разность потенциалов, d – расстояние между электродами, получим для эффекта Поккельса:

$$n = n_0 - \frac{r n_0^3 U}{2d} .$$

В анизотропных материалах описанные выше свойства зависят также от направления распространения волны в кристалле.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента преломления ниобата лития, n , от приложенного напряжения и толщины пластины.

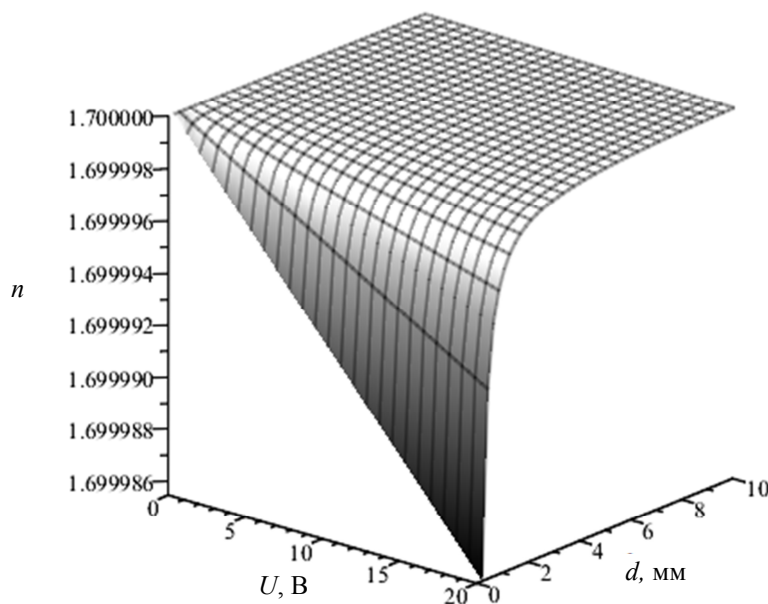


Рис. 4. Расчетная зависимость коэффициента преломления ниобата лития

При этом оптическая ось пластины ориентирована перпендикулярно плоскости пластины. Из результатов наших расчетов следует, что изменение коэффициента преломления наблюдается только в шестом знаке после запятой, причем изменение толщины слоя оказывает большее влияние на коэффициент преломления, чем напряжение.

Результаты исследования сдвига фазы волны (в градусах) длиной 1 550 нм, распространяющейся перпендикулярно пластине толщиной 10 мм от приложенного напряжения, представлены на рис. 5.

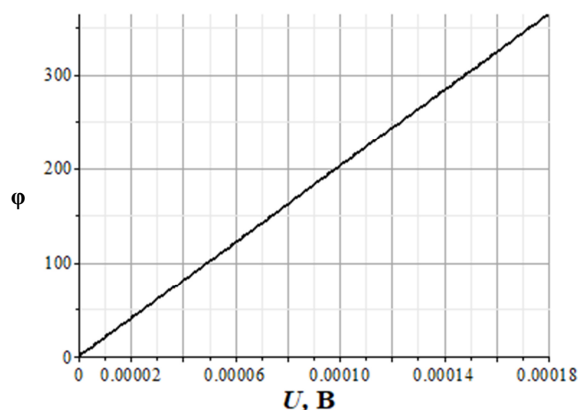


Рис. 5. Зависимость сдвига фазы от напряжения

Таким образом, изменение напряжения в пределах до 180 мкВ приводит к сдвигу фаз на 360° , что является достаточным для управления антенной.

Система линз

Линзовая система должна преобразовывать лучи, выходящие из фазовращателя, таким образом, чтобы расстояние между ними на выходе системы составляло порядка половины длины волны. Кроме того, выходные лучи должны быть параллельны друг другу. Пример такой системы представлен на рис. 6.

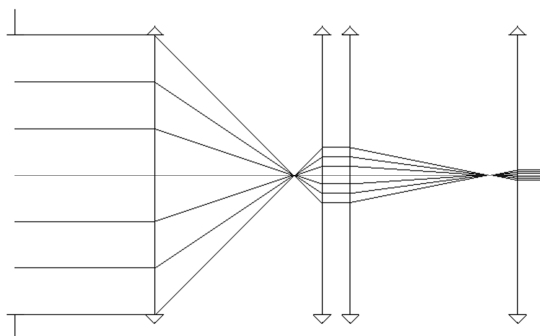


Рис. 6. Схема линзовой системы

Расчет этой системы с используемой длиной волны 1 550 нм получен с помощью системы параксиальных линз в программе ZEMAX. Здесь представлена многоступенчатая схема, каждый «каскад» которой уменьшает расстояние между лучами приблизительно в 5 раз. Очевидно, что с помощью многоступенчатой схемы можно получить любое расстояние между выходными лучами.

Заключение

В данной работе представлены физические основы построения оптической антенной решетки. Данная антенная решетка основана на системе зеркал и линз. Для обеспечения необходимого фазового сдвига предлагается структура на основе ниобата лития. Найдены основные аналитические выражения, описывающие поведение системы. Также представлены результаты расчета параметров линзовой системы в программе ZEMAX.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao Y., Alu A. Optical nanoantennas and their applications // Proceedings IEEE Radio and Wireless Symposium (Piscataway, NJ, United States, 20–23 January 2013). P. 58–60.
2. Snyder H. S., Platt J. R. Principles of Optical Communication Systems General Properties of Non-Image Forming Projectors and Receivers // Journal of the Optical Society of America. 1948. V. 38 (3). P. 269–278.

3. *Smith W.* Modern optical engineering. New York: McGraw-Hill, 2000. P. 618.
4. *Пат. РФ 2552142С2.-2015.* Оптическая фазированная антенная решетка / Вербя В. С., Воронцов Л. В., Даниленко Д. А., Бабайлов А. А.; опубл. 06.10.2015.
5. *Peter J. W., Neilson D. T., Andrew A. R.* Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years // *Optics Express*. 2018. V. 26 (18). P. 24190–24239.
6. *Krasnok A. E., Maximov I. S., Denisjuk A. I.* Optical nanoantennas // *Usp. Phys. Nauk*. 2013. V. 183. N. 6. P. 561–589.
7. *Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Barabanov I. O.* Next-generation switching system based on 8×8 self-turning optical cell // *Proceedings Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Moscow, 2018. P. 306–310.
8. *Vishnevskiy V., Semenova O.* Queueing system with alternating service rates for free space optics-radio hybrid channel // *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. 2010. N. 6235 LNCS. P. 79–90.
9. *Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L.* Optical Antennas // *Advances in Optics and Photonics*. 2009. P. 438–483.
10. *Eggleston M. S.* Optical antenna enhanced nanoLEDs for on-chip optical interconnects // 2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM) Conference (Nassau, Bahamas, 13–15 July 2015). P. 152–154.
11. *Matyunina S. A., Fedotova Y. A., Babaeva O. G., Wirchenko M. K., Gusev M. Y., Neustroev N. S.* Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems // *Procedia Engineering*. 2015. V. 106. P. 202–209.
12. *Li G. Z., Chen Y. P., Jiang H. W., Chen X-F.* Enhanced Kerr electro-optic nonlinearity and its application in controlling second-harmonic generation // *Photonics Research*. 2015. V. 3 (4). P. 168–172.

Статья поступила в редакцию 11.06.2019

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вытовтов Константин Анатольевич – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. физ.-мат. наук, доцент; доцент кафедры связи; Vytovtov_konstan@mail.ru.

Барабанова Елизавета Александровна – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры связи; ElizavetaAlexB@yandex.ru.

Игумнов Михаил Александрович – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры связи; igumnovma@mail.ru.



PHYSICAL FOUNDATIONS OF BUILDING OF OPTICAL ANTENNA WITH LITHIUM NIOBATE

K. A. Vytovtov, E. A. Barabanova, M. A. Igumnov

*Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russian Federation*

Abstract. The article highlights a promising direction for high-speed signal transmission in wireless optical communication systems, namely, the use of optical antennas. Unlike fiber-optic systems which are sufficiently advanced today, today only one patent and one work are performed to describe the optical antenna array, which describes the optical antenna array for transmitting the optical signal in telecommunication networks. An important task in creating the antenna is selecting intelligent material to control the radiation pattern. The main physical foundations of optical antenna array have been described. The antenna array is based on the mirror system and lens system. To provide the necessary phase shift, two kinds of structures are proposed: of lithium niobate and of ferrite-garnet. The main analytical expressions describing system behavior are found for the first time.

Key words: optical antenna, antenna pattern, lens system, phase shifter, lithium niobate.

For citation: Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Igumnov M. A. Physical foundations of building of optical antenna with lithium niobate. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*. 2019;3:44-52. (In Russ.) DOI: 10.24143/2072-9502-2019-3-44-52.

REFERENCES

1. Zhao Y., Alu A. Optical nanoantennas and their applications. *Proceedings IEEE Radio and Wireless Symposium (Piscataway, NJ, United States 20-23 January 2013)*. Pp. 58-60.
2. Snyder H. S., Platt J. R. Principles of Optical Communication Systems General Properties of Non-Image Forming Projectors and Receivers. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, vol. 38 (3), pp. 269-278.
3. Smith W. *Modern optical engineering*. New York, McGraw-Hill, 2000. P. 618.
4. Verba V. S., Vorontsov L. V., Danilenko D. A., Babailov A. A. *Opticheskaya fazirovannaya antennaya reshetka* [Optical phase antenna array]. Patent RF, no. 2552142, 06.10.2015.
5. Peter J. W., Neilson D. T., Andrew A. R. Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Optics Express*, 2018, vol. 26 (18), pp. 24190-24239.
6. Krasnok A. E., Maximov I. S., Denisyyuk A. I. Optical nanoantennas. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2013, vol. 183, no. 6, pp. 561-589.
7. Vytovtov K. A., Barabanova E. A., Barabanov I. O. Next-generation switching system based on 8×8 self-turning optical cell. *Proceedings International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering*. Moscow, 2018. Pp. 306-310.
8. Vishnevskiy V., Semenova O. Queueing system with alternating service rates for free space optics-radio hybrid channel. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2010, no. 6235 LNCS, pp. 79-90.
9. Bharadwaj P., Deutsch B., Novotny L. Optical Antennas. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, pp. 438-483.
10. Eggleston M. S. Optical antenna enhanced nanoLEDs for on-chip optical interconnects. *2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM) Conference (Nassau, Bahamas, 13-15 July 2015)*. Pp. 152-154.
11. Matyunina S. A., Fedotova Y. A., Babaeva O. G., Wirchenko M. K., Gusev M. Y., Neustroev N. S. Fiber-optical sensors based on mono-crystal films of garnet ferrites for mechatronic systems. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 106, pp. 202-209.
12. Li G. Z., Chen Y. P., Jiang H. W., Chen X-F. Enhanced Kerr electro-optic nonlinearity and its application in controlling second-harmonic generation. *Photonics Research*, 2015, vol. 3 (4), pp. 168-172.

The article submitted to the editors 11.06.2019

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vytovtov Konstantin Anatolyevich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Communication; Vytovtov_konstan@mail.ru.

Barabanova Elizaveta Aleksandrovna – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Communication; ElizavetaAlexB@yandex.ru.

Igumnov Mikhail Aleksandrovich – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Communication; igumnovma@mail.ru.

