

Гибридная оптическая антенна на основе нитрида кремния для пространственного сканирования

С.Д. Мошиченко *^{1,2}, А.Б. Клещенко^{1,2}

¹ *Физический факультет, Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

² *ООО «НПО СМАРТСЕНС», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация*

Статья поступила в редакцию 09.10.2025

Одобрена после рецензирования 27.10.2025

Принята к публикации 31.10.2025

Аннотация

Оптические интегральные схемы (ОИС) являются перспективными устройствами с достаточно широкой областью применения. ОИС могут выступать в качестве замены светоизлучающих диодов, фотоприемников, преобразователей солнечной энергии, датчиков и т.д. Особого внимания заслуживает использование ОИС в системах пространственного сканирования (лидарах) в качестве замены механических и электромеханических методов сканирования. Оптические антенны (ОА) – структуры в составе ОИС, излучающие за счёт нарушения условия полного внутреннего отражения в оптическом волноводе. ОА с низким контрастом показателя преломления могут обладать большой апертурой, обеспечивающей сужение диаграммы направленности (ДН). Такие ОА часто входят в состав одномерной антенной решётки (АР), направление излучения которой в плоскости апертуры ОА изменяется с помощью длины волны, а в перпендикулярной плоскости – за счет фазового распределения между ОА. В работе рассмотрены несколько известных конструкций ОА и представлены их характеристики. Далее, в работе предложен новый вариант ОА, в основе которой лежит гибридная асимметричная двойная структура из нитрида кремния, проведено сравнение характеристик предложенного варианта с известными конструкциями и показано его преимущество. Результаты моделирования одиночного излучателя ИК диапазона (1.55 мкм) показывают, что предложенная структура имеет коэффициент усиления 30.4 дБи, уровень боковых лепестков -32.3 дБ, ширину главного лепестка 0.2° и 23.9° в продольной и поперечной плоскостях соответственно, а перестройка ДН в продольной плоскости составляет 9.3° при изменении длины волны от 1.5 до 1.6 мкм.

Ключевые слова: оптическая антенна, интегральная оптика, нитрид кремния, оптическая ФАР, пространственное сканирование, лидар

EDN: DWCKPR

doi:10.24412/2949-0553-2025-519-28-35

Hybrid silicon nitride based optical antenna for spatial scanning

S.D. Moshichenko*^{1,2}, A.B. Kleshchenkov^{1,2}

¹ *Faculty of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation*

² *«NPO SMARTSENS» LLC, Rostov-on-Don, Russian Federation*

* moshichenko@sfedu.ru

* Автор, ответственный за переписку: Сергей Дмитриевич Мошиченко, moshichenko@sfedu.ru

Abstract

Optical integrated circuits (IC) are promising devices applicable in many areas. Such devices might be used as replacement of photoemitting diodes, photodetectors, solar energy converters, detectors etc. A particular emphasis should be given to spatial scanning where an optical IC replaces mechanical and mechano-electrical scanning methods. Optical antennas (OA) are optical IC structures coupling guided and free-space modes by breaking total internal reflection in optical waveguides. Low refractive index contrast OAs might have large linear aperture narrowing a radiation pattern. Such OAs conclude 1D phased array often, in which a wavelength tuning steers main beam in OA aperture plane, and a phase shift does it in transverse one. In this work, several common OAs designs are reviewed, and their properties are described. Onwards, a new silicon nitride hybrid asymmetric double stripe OA design is proposed. An infrared ($1.55 \mu\text{m}$) band modelling results presented denote that model proposed has 30.4 dBi directivity, -32.3 dB SLL, 0.2° and 23.9° FWHM in longitudinal and transverse planes respectively, and 9.3° longitudinal field of view (FOV) on 1.5-1.6 μm wavelength tuning.

Key words: optical antenna, integrated optics, silicon nitride, optical phased array, spatial scanning, LIDAR

Введение

Оптические интегральные схемы (ОИС) – активно развивающееся направление в интегральной оптике. Некоторые ОИС могут выступать в качестве компактной замены существующих оптических устройств – светоизлучающих диодов, УФ фотоприемников, преобразователей солнечной энергии, высокочувствительных датчиков и др. Кроме того, ОИС открывают широкие возможности создания новых оптических устройств [1, 2]. Шины данных интегральных схем на основе ОИС [3] работают в оптическом диапазоне частот и обладают гораздо большей пропускной способностью благодаря высокой частоте. Особого внимания заслуживает применение ОИС в системах пространственного сканирования. В частности, в сканирующих лидарах – лазерных дальномерах – применяемых в беспилотных системах, системах контроля на производстве и так далее.

Современные ОИС, как правило, работают в частотных диапазонах оптической связи и являются совместимыми с КМОП-технологией, что упрощает их производство. Однако эти факторы ограничивают выбор материалов ОИС. К таким материалам относятся: кремний (Si), нитрид кремния (Si_3N_4), оксид кремния (SiO_2) и прочие. Оптические антенны (ОА) – излучающие структуры внутри ОИС, зачастую созданные на основе планарного оптического волновода. В ИК диапазоне базовая мода такого волновода – TE [4]. Нарушение полного внутреннего отражения такого волновода нерегулярными элементами (например, вырезами) вызывает излучение во вне, превращая волновод в ОА. В зависимости от геометрии таких неоднородностей в ОА имеют место различные излучающие явления. Вырезы в широкой стенке волновода с периодом, близким к длине волны, являются сильной неоднородностью для локализованной моды, подвергающейся дифракции на их границах. При уменьшении периода до длины, меньшей чем длина волны, в среде возникают свои полосы пропускания и подавления, что используется при создании оптических фильтров [5]. Для получения узкого главного лепестка диаграммы направленности (ДН) короткой высококонтрастной ОА необходима многоэлементная двумерная антенная решётка (АР) [6] с большим числом делителей. Длинные малококонтрастные ОА [7, 8], как правило, используются в параллельных АР, поперечное направление излучения в которых управляется изменением фазового распределения, а продольное (вдоль направления распространению волны) – длиной волны.

Основная часть

Антенна на основе дифракционной решётки (ДР-антенна) является наиболее простой ОА и представляет из себя оптический волновод с периодическими вырезами в широкой стенке. Особую роль в ней играет контраст показателей преломления на границе раздела, оказывающий влияние на скорость затухания локализованной моды вследствие рассеяния. Зачастую выбор определённого материала ограничивает размер апертуры ОА. Так, например, габариты ДР-антенны из кремния ($n = 3.479$, $\Lambda = 1.55 \mu\text{m}$) редко превышают десятки микрон, тогда как антенны из нитрида кремния ($n = 1.996$, $\Lambda = 1.55 \mu\text{m}$) могут иметь длину до 1 мм и более. Вырезы в широкой стенке могут быть как на не полную глубину волновода, так и в предельном случае, разделяющими волновод на отдельные элементы. Затухание растёт по мере увеличения глубины вырезов и, в пределе, становится максимальным для случая полного разделения волновода на отдельные элементы. Пример типовой слабоконтрастной ДР-антенны из нитрида кремния на основе периодической структуры приведён на рис. 1. Направление распространения волны в этой модели и в других, приведённых далее, совпадает с положительным направлением оси Z. При моделировании ДР-антенны использованы параметры из [1]. Волна подводится

по оптическому волноводу (1) к периодической излучающей структуре (2), находящейся над кремниевой подложкой (3) в окружении покрытия из оксида кремния (4). Учитывается воздушная прослойка (5) вблизи поверхности ОИС. ДН этой и других промоделированных антенн построена в полярной системе координат, оси которой показаны на рис. 2.1. Как видно на рис. 2.2 и рис. 2.3, ДН ДР-антенны имеет большие задние лепестки, направленные в сторону подложки. Для их подавления необходим отражатель. В качестве таких отражателей можно использовать тонкие металлические плёнки [10], полости с металлическим напылением [11], а также диэлектрические зеркала Брэгга [12].

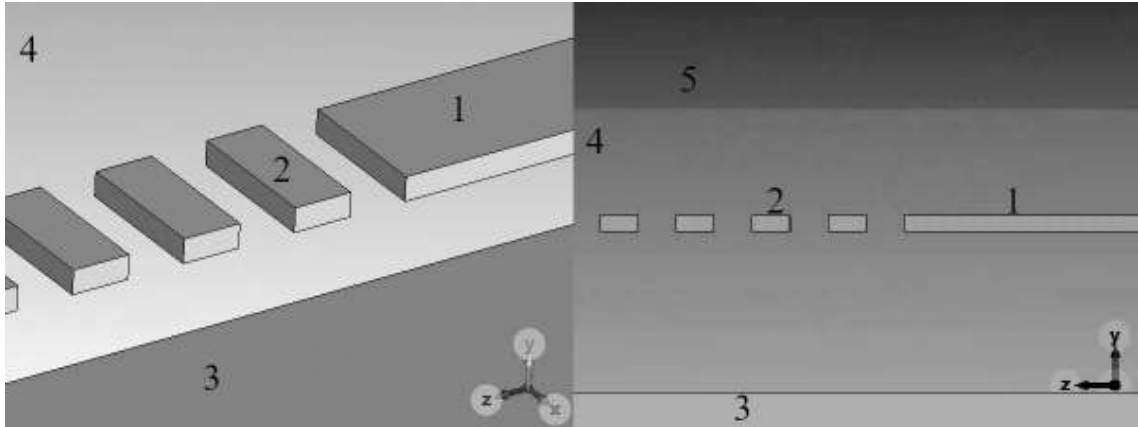


Рисунок 1 – Общий вид ДР-антенны (слева) и её продольный разрез (справа); 1 – оптический волновод, 2 – периодическая излучающая структура, 3 – кремниевая подложка, 4 – покрытие из оксида кремния, 5 – воздушная прослойка

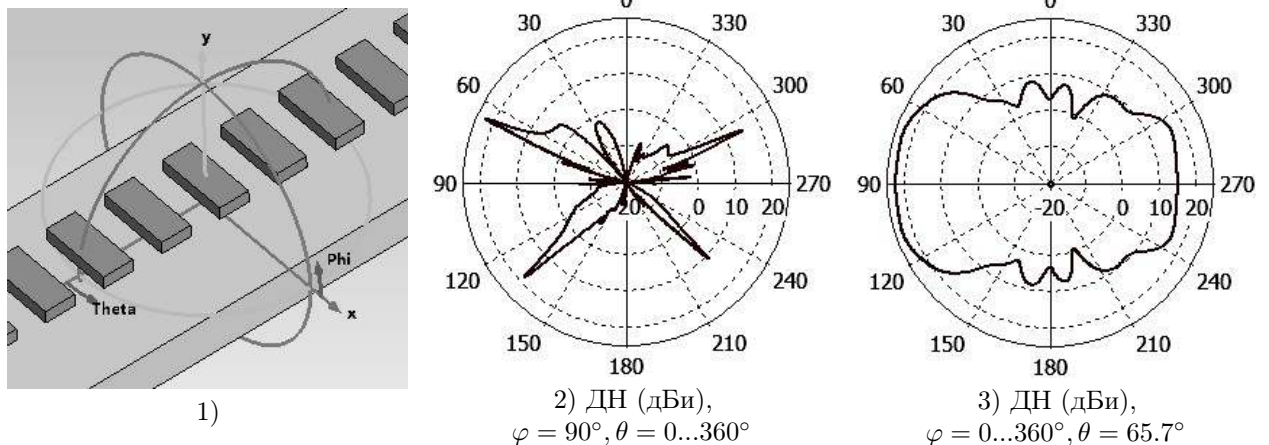


Рисунок 2 – Антенна на основе ДР из нитрида кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

В некоторых ОА с вырезами в узкой стенке (боковыми вырезами) [13] может возникнуть эффект связанных мод (СМ) [14], являющийся особым режимом распространения локализованной моды. Вырезы в узкой стенке не являются существенным препятствием для этой моды, а дифракция на них ослаблена. Локализованная мода внутри такой антенны и мода в свободном пространстве связаны довольно слабо даже при существенном контрасте показателей преломления. Внешний вид такой ОА приведен на рис. 3. При моделировании СМ антенны использованы параметры из [15].

Излучение антенны с эффектом СМ (СМ-антенны) в основном обусловлено резонансными явлениями, благодаря чему все лепестки ДН, за исключением единственного широкого лепестка, обладают малой шириной в продольной плоскости, как показано на рис. 4. Помимо этого, имеет место боковое излучение в поперечной плоскости, вызванное рассеянием на боковых вырезах, что ухудшает направленность антенны.

Отдельного внимания заслуживают многослойные ОА. Наличие нескольких слоёв открывает широкие возможности контроля над полем локализованной моды. Поле моды такой ОА концентрируется в областях с высоким эффективным показателем преломления (ЭПП). Многослойная ОА объединяет несколько таких слоёв, ЭПП которых может отличаться, причём мода в такой ОА локализуется в слоях, обладающих большим ЭПП. Такой метод локализации применяется в антенне на основе асиммет-

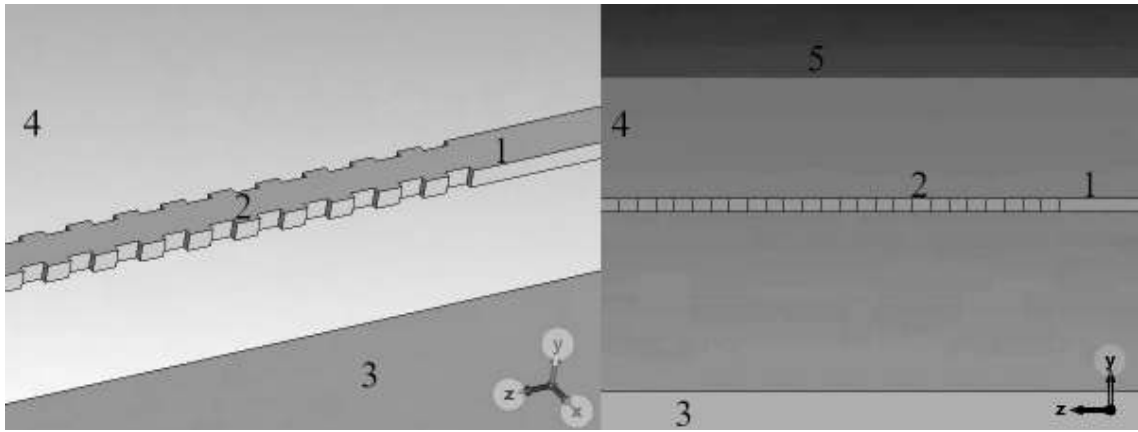


Рисунок 3 – СМ-антенна (слева) и её продольный разрез (справа); 1 – оптический волновод, 2 – периодическая излучающая структура, 3 – кремниевая подложка, 4 – покрытие из оксида кремния, 5 – воздушная прослойка

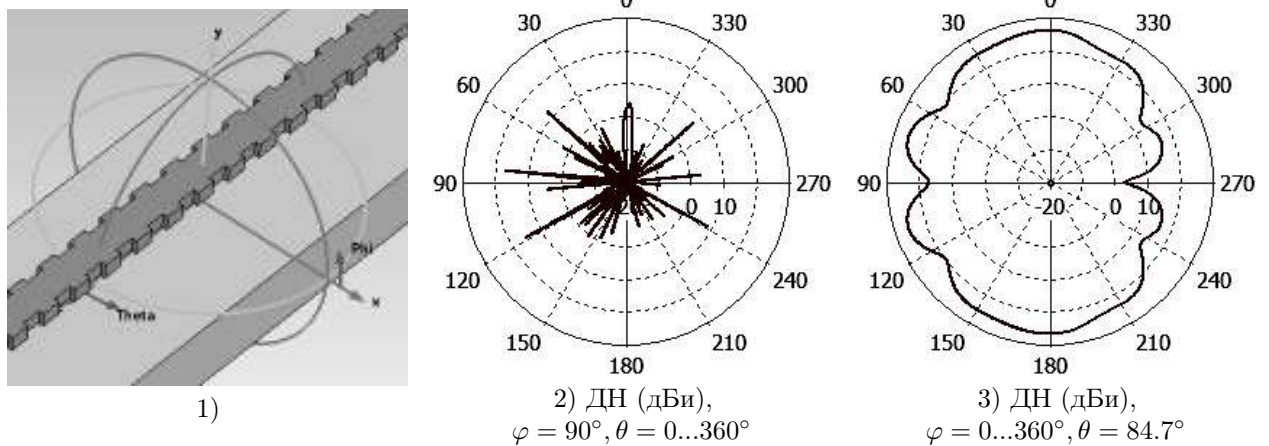


Рисунок 4 – СМ-антенна из кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

ричной двойной структуры (АДС-антенна), состоящей из двух параллельных ДР-антенн, создающих поля, интерферирующие в резонансной полости между ними. В антенне, описанной в [16], решётка с большей толщиной расположена сверху, конструкция такой ОА показана на рис. 5. Повышая таким образом эффективный показатель преломления в верхней области, возможно увеличить интенсивность локализованной моды в верхнем полоске АДС-антенны, что частично ослабляет задние лепестки. ДН АДС-антенны приведена на рис.6. ДР-антенны в ней отделены резонансной полостью с высотой (h) 0.1 мкм. АДС-антенна демонстрирует лучшую направленность по сравнению с обычной ДР-антенной, а также более узкий главный лепесток. Кроме того, для интерференции в резонансной полости АДС-антенны достаточно совпадения периодов обеих антенн, которые её составляют, что позволяет объединять антенны разных типов в рамках одной конструкции, например, ДР- и СМ-антенны.

В этой работе предложен новый тип антенны, представляющий из себя гибридную АДС-антенну из нитрида кремния, работающую в диапазоне 1.55 мкм. Её участок приведён на рис. 7. Она состоит из СМ-антенны (2) и ДР-антенны (3). Периоды обеих антенн подобраны исходя из максимума их суммарного излучения. Оптимальный период ДР- и СМ-антенны был получен путем численного моделирования и составляет ~ 0.775 мкм. Высота верхнего полоска ($h_{\text{вп}}$) составляет 0.175 мкм, нижнего ($h_{\text{нп}}$) – 0.075 мкм, резонансной полости ($h_{\text{рез}}$) – 0.1 мкм, верхнего слоя оксида кремния ($h_{\text{вос}}$) – 2 мкм, нижнего ($h_{\text{нос}}$) – 3 мкм, кремниевой подложки ($h_{\text{под}}$) – 1 мкм. Ширины обоих полосков совпадают и составляют 1.1 мкм. Глубина боковых вырезов верхнего полоска составляет 0.08 мкм. Сдвиг периодов (b) определяет уровень главного лепестка ДН при длине волны 1.55 мкм. Значение сдвига периодов 0.412 мкм получено в рамках численного моделирования.

На рис. 8 приведены ДН гибридной АДС-антенны при $\Lambda = 1.55$ мкм. Ширина главного лепестка в продольной плоскости при этой длине волны составляет 0.1 градус. Во всём диапазоне перестройки главный лепесток имеет ширину до 0.2 градусов в продольной плоскости, при этом в поперечной плоскости его ширина составляет до 23.9 градусов. Антенна обладает коэффициентом усиления 34.9 дБи.

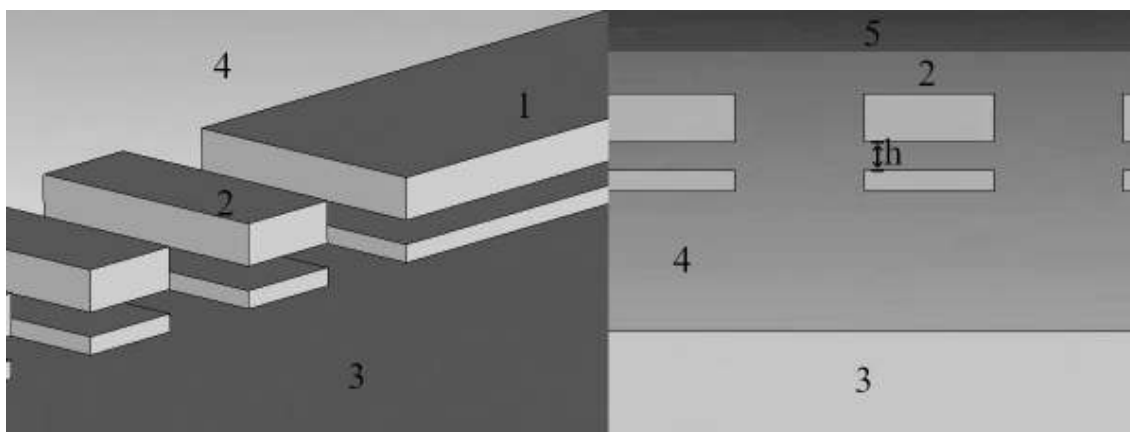


Рисунок 5 – АДС-антенна (слева) и её продольный разрез (справа); 1 – оптический волновод, 2 – периодическая излучающая структура, 3 – кремниевая подложка, 4 – покрытие из оксида кремния, 5 – воздушная прослойка

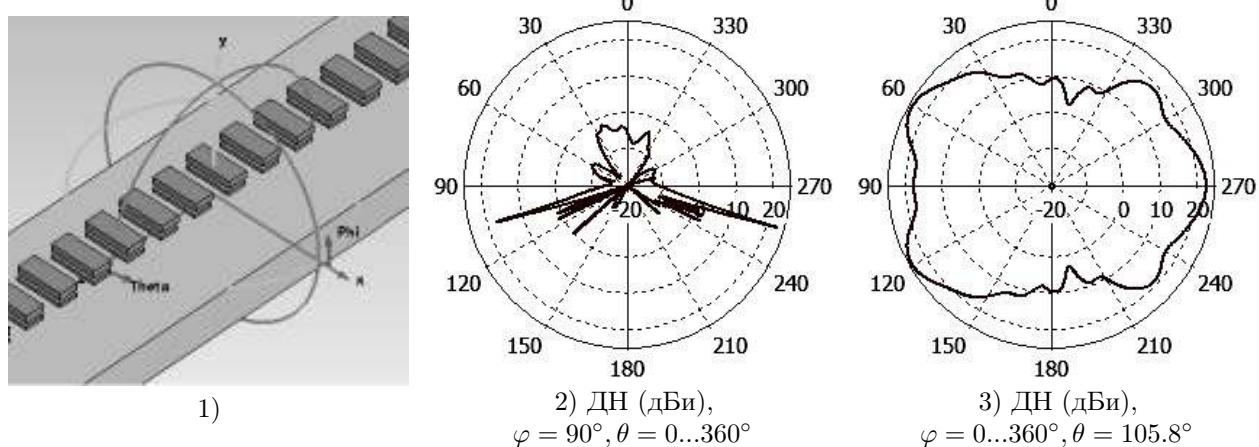


Рисунок 6 – АДС-антенна из нитрида кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

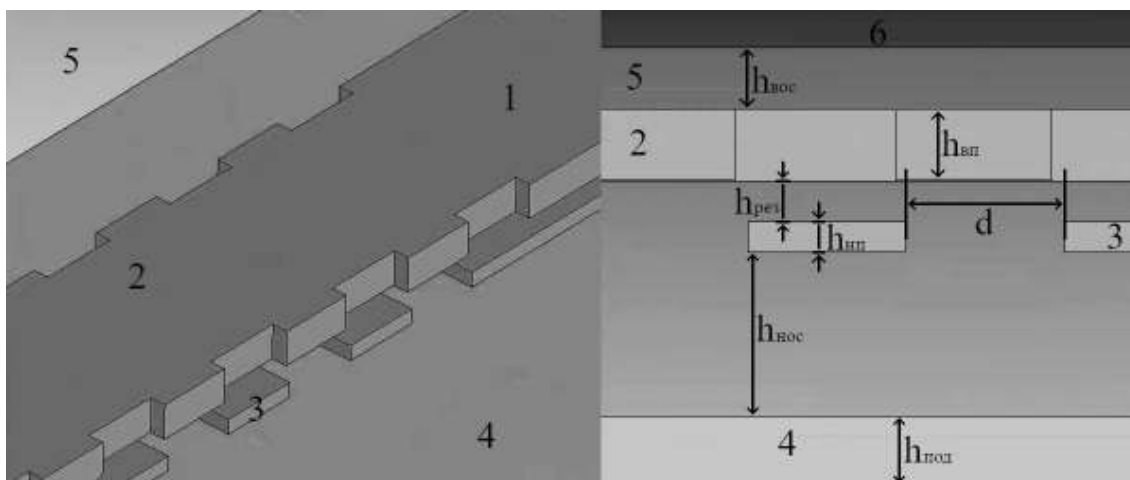


Рисунок 7 – Гибридная АДС-антенна (слева) и иллюстрация её продольного разреза (справа); 1 – оптический волновод, 2 – СМ-антенна, 3 – ДР-антенна, 4 – кремниевая подложка, 5 – прослойка из оксида кремния ($n = 1.46$), 6 – воздушная прослойка

Боковые лепестки, характерные как для ДР и СМ по отдельности, так и для АДС, эффективно подавляются в гибридной структуре, а их относительный уровень не превышает -36 дБ. Присутствуют ярко выраженные задние лепестки, уровень наибольшего из которых составляет -8.7 дБ. Управление направлением максимума ДН в продольной плоскости гибридной АДС-антенны может осуществляться путём перестройки длины волны. Зависимость положения максимума ДН от длины волны приведена на рис. 9.

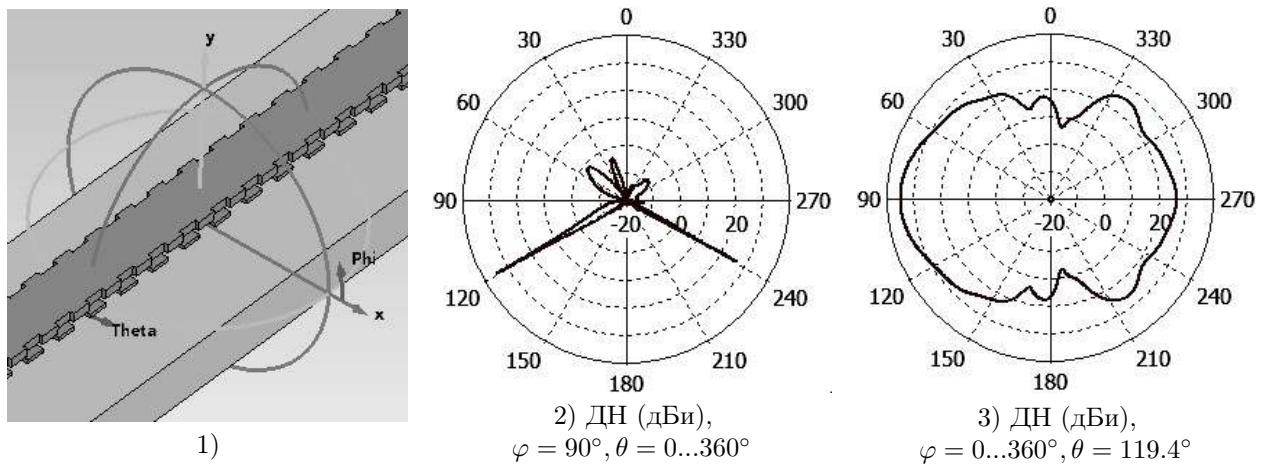


Рисунок 8 – Гибридная АДС-антенна из нитрида кремния (1), её ДН в продольной плоскости (2) и ДН в плоскости её главного лепестка (3)

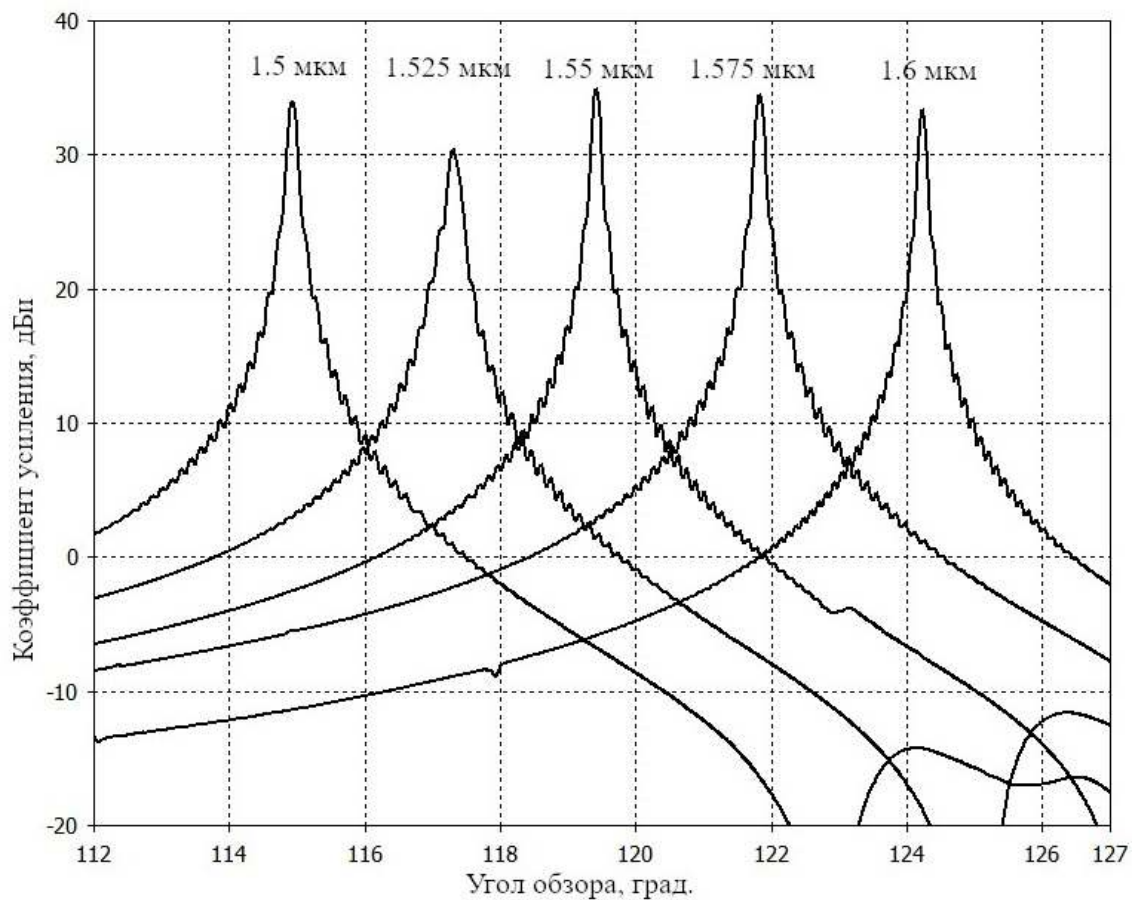


Рисунок 9 – Зависимость направления главного лепестка ДН от длины волны

ДН антенн, приведённые на рис. 2, 4, 6, были получены путём моделирования ОА из указанных работ с соблюдением всех геометрических параметров – периода, сечения, глубины выреза, и т.д. Материалы, задействованные в этих моделях – кремний, оксид кремния и нитрид кремния – параметризовались значениями показателей преломления для диапазона 1.55 мкм из [17–19]. Остальные параметры – учёт воздушной прослойки у поверхности ОИС, толщина кремниевой подложки и прочие совпадают для всех моделей. Сравнительный анализ по результатам моделирования гибридной АДС и других конструкций ОА приведён в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнительный анализ гибридной АДС-антенны с другими ОА по результатам моделирования в равных условиях

Оптическая антенна	Коэффициент усиления, дБи	Уровень боковых лепестков (без отражения), дБ	Ширина главного лепестка (θ), град.	Ширина главного лепестка (φ), град.	Угол перестройки (θ) (1.5-1.6 мкм), град.
ДР (Si_3N_4)	22.3	-4.2	1.1	41.2	5
АДС (Si_3N_4)	22.4	-20.5	0.4	26.7	7
СМ (Si)	17.2	-2.3	0.2	41.9	39.8
Гибридная АДС (Si_3N_4)	30.4	-32.3	0.2	23.9	9.3

Заключение

Предложена гибридная АДС-антенна, эффективно сочетающая в себе два различных вида ОА – ДР- и СМ-антенны. Антенна обладает хорошей направленностью за счёт механизма подавления боковых лепестков, а асимметрия позволяет минимизировать задние лепестки благодаря локализации направляемой моды в верхней СМ-антенне с большей высотой, и, как следствие, большим эффективным показателем преломления. В пакете CST создана и численно исследована модель предложенной ОА длиной 1 мкм. Результаты моделирования показали, что антенна достигает коэффициента усиления до 34.9 дБи при длине волны 1.55 мкм. Ширина главного лепестка при этом составляет 0.1° в продольной плоскости и 23.9° в поперечной. Перестройка направления главного лепестка в продольной плоскости в диапазоне длин волн от 1.5 до 1.6 мкм составляет 9.3° , при этом неравномерность коэффициента усиления находится в пределах 4.5 дБ. Уровень боковых лепестков не превышает -32.3 дБ во всём диапазоне перестройки. Кроме того, имеет место уширение главного лепестка в продольной плоскости до 0.2° . Рассмотренный подход подавления боковых лепестков может использоваться в схожих конструкциях ОА с малым углом перестройки главного лепестка в продольной плоскости.

Список литературы

- [1] Vyhlička S. et al. All-dielectric diffraction grating for multi-petawatt laser systems // Optics and Measurement Conference 2014. SPIE. 2015. № 9442. С. 395-399. doi: [10.1117/12.2086800](https://doi.org/10.1117/12.2086800) EDN: UFJQSV
- [2] Kalinchenko G. et al. High reflective diffraction grating for ultrafast pulse compression // High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology II. SPIE. 2015. № 9513. С. 104-108. doi: [10.1117/12.2185696](https://doi.org/10.1117/12.2185696) EDN: WNUWQL
- [3] Krishnamoorthy A. V. et al. From chip to cloud: Optical interconnects in engineered systems // Journal of Lightwave Technology. 2017. Т. 35. №. 15. С. 3103-3115.
- [4] Marchetti R., Lacava C., Carroll L., Gradkowski K., Minzioni P. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips // Photonics Research. 2019. № 2(7). С. 201-239. doi: [10.1364/PRJ.7.000201](https://doi.org/10.1364/PRJ.7.000201) EDN: YDLBYX
- [5] Norton S., Erdogan T., Morris G. Coupled-mode theory of resonant-grating filters // Journal of the Optical Society of America A. 1997. № 3(14). С. 629-639.
- [6] Taillaert D., Van Laere F., Ayre M., Bogaerts W., Van Thourhout D., Bienstman P., Baets R. Grating couplers for coupling between optical fibers and nanophotonic waveguides // Japanese Journal of Applied Physics. 2006. № 8(45). С. 6071. doi: [10.1143/JJAP.45.6071](https://doi.org/10.1143/JJAP.45.6071) EDN: LNIGID
- [7] Sun J., Timurdogan E., Yaacobi A., Hosseini E., Watts M. Large-scale nanophotonic phased array // Nature. 2013. № 7431 (493). С. 195-199.
- [8] Im C., Bhandari B., Lee K., Kim S., Oh M., Lee S. Silicon nitride optical phased array based on a grating antenna enabling wavelength-tuned beam steering // Optics express. 2020. № 3(28). С. 3270. doi: [10.1364/oe.383304](https://doi.org/10.1364/oe.383304) EDN: TVVOWJ
- [9] Liu Y., Zhang C., DeSantis D., Hu D., Meissner T., Notaros J., Klamkin J. High-resolution arrayed waveguide grating-assisted passive optical phased array for 2D beam steering // Optics Express. 2025. № 4(33). С. 7714-7722. doi: [10.1364/oe.549588](https://doi.org/10.1364/oe.549588) EDN: HUIGQM

- [10] Van Laere F. et al. Compact and highly efficient grating couplers between optical fiber and nanophotonic waveguides. *Journal of lightwave technology*. 2007. Т. 25. N. 1. С. 151-156.
- [11] Zaoui WS, Kunze A, Vogel W, Berroth M. CMOS-compatible polarization splitting grating couplers with a backside metal mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2013. Т. 25. N. 14. С. 1395-1397.
- [12] Selvaraja S. K. et al. Highly efficient grating coupler between optical fiber and silicon photonic circuit. *Conference on Lasers and Electro-Optics // Optica Publishing Group*. - 2009.
- [13] Xu H., Shi Y. Diffraction engineering for silicon waveguide grating antenna by harnessing bound state in the continuum // *Nanophotonics*. 2020. № 6(9). С. 1439-1446. doi: [10.1515/nanoph-2020-0018](https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0018) EDN: [VUAFSB](https://www.edn.net/VUAFSB)
- [14] Melik-Gaykazyan E., Koshelev K., Choi J., Kruk S., Bogdanov A., Park H., Kivshar Y. From Fano to quasi-BIC resonances in individual dielectric nanoantennas // *Nano Letters*. 2021. № 4(21). С. 1765-1771. doi: [10.1021/acs.nanolett.0c04660](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c04660) EDN: [MYQNJW](https://www.edn.net/MYQNJW)
- [15] DeSantis D., Mazur B., Notaros M., Notaros J. Multi-beam solid-state LiDAR using star-coupler-based optical phased arrays // *Optics Express*. 2024. №32(21). С. 36656-36673. doi: [10.1364/oe.537489](https://doi.org/10.1364/oe.537489) EDN: [MLGWMM](https://www.edn.net/MLGWMM)
- [16] Prousalidi T., Syriopoulos G., Kyriazi E., Botter R., Zervos C., Pouloupoulos G., Apostolopoulos D. Flat Emission Silicon Nitride Grating Couplers for Lidar Optical Antennas // *MDPI Photonics*. 2025. № 3(12). С. 214. doi: [10.3390/photonics12030214](https://doi.org/10.3390/photonics12030214) EDN: [GGSCFF](https://www.edn.net/GGSCFF)
- [17] Franta D. et al. Temperature-dependent dispersion model of float zone crystalline silicon // *Applied Surface Science*. 2017. № 421. С. 405-419.
- [18] Tan C. Z. Determination of refractive index of silica glass for infrared wavelengths by IR spectroscopy // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 1998. № 1-2 (223). С. 158-163. doi: [10.1016/S0022-3093\(97\)00438-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(97)00438-9)
- [19] Luke K. et al. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si3N4 microresonator // *Optics letters*. 2015. № 21(40). С. 4823-4826. doi: [10.1364/OL.40.004823](https://doi.org/10.1364/OL.40.004823)

Ссылка для цитирования:

Мошиченко С.Д., Клещенков А.Б. Гибридная оптическая антенна на основе нитрида кремния для пространственного сканирования // *Современная электродинамика*. 2025. Т. 4, № 5(19). С. 28-35. EDN [DWCKPR](https://www.edn.net/DWCKPR), doi: [10.24412/2949-0553-2025-519-28-35](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-519-28-35)

Citation link:

Moshichenko S.D., Kleshnikov A.B. Hybrid silicon nitride based optical antenna for spatial scanning // *Modern Electrodynamics*. 2025. Vol. 4, No. 5(19). P. 28-35. EDN [DWCKPR](https://www.edn.net/DWCKPR), doi: [10.24412/2949-0553-2025-519-28-35](https://doi.org/10.24412/2949-0553-2025-519-28-35)