

УДК 621.383

Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4

^{1,2} Кулинич И. В., ² Сомогонянц А. А.,
^{1,2} Шестериков Е. В., ² Моховиков Д. М.

¹ *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
пр-т Ленина, д. 40, г. Томск, 634050, Российская Федерация
kulinich@tusur.ru*

² *Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева
пл. Академика Зуева, д. 1, г. Томск, 634055, Российская Федерация*

Получено: 20 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: В работе представлены исследования, направленные на разработку технологии формирования гребенчатого интегрально-оптического волновода на основе пленки Si_3N_4 . Приведены результаты исследования влияния режимов плазменного осаждения на структуру пленок SiO_2 и Si_3N_4 и режимов плазменного травления волновода на профиль гребенки и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: фотонные интегральные схемы, фазовая решетка, нитрид кремния на изоляторе.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4 / И. В. Кулинич и др. // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 3. С. 318—324.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Интегральные оптические волноводы на основе пленок Si_3N_4 / И. В. Кулинич, А. А. Сомогонянц, Е. В. Шестериков, Д. М. Моховиков // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 3. — С. 318—324.

1. Введение и основная часть

В настоящее время актуальным вопросом является сопряжение оптоволокна с интегральным волноводом, что играет важную роль в интегральных фотонных технологиях.

В фотонных интегральных схемах (ФИС) для достижения высокой эффективности ввода света при соединении оптоволокна диаметром 10 мкм

и волновода диаметром 1 мкм необходимо использовать дополнительные конструкции, так называемые элементы ввода.

Наиболее распространенные платформы ФИС, где необходимо применять решеточные методы ввода, являются платформы на основе материалов кремний на изоляторе (*SoI*) и нитрид кремния на изоляторе (*SiNoI*). Кроме этого, на сегодняшний день активно ведется разработка волноводов на тонкопленочном ниобате лития на изоляторе (*LiNbO₃*).

На основе проведенного литературного обзора и проведенных расчетов [1—3] была выбрана волноводная структура нитрида кремния на изоляторе, толщиной 350 нм и шириной 1 мкм, расположенная на пленке *SiO₂*, толщиной 2 мкм, и покрывающей пленки *SiO₂* толщиной 2 мкм.

Осаждение пленки *SiO₂* осуществлялось методом плазмохимического осаждения в плазме *SH₄/N₂O* при *ICP* мощности 600 Вт. Формирование гребенчатого волновода осуществлялось методом плазмохимического травления в плазме *SF₆* на установке *STE ICP200E* через фоторезистивную маску травления. На рисунках 1, 2 представлены фотографии гребенчатых волноводов при различных режимах травления.

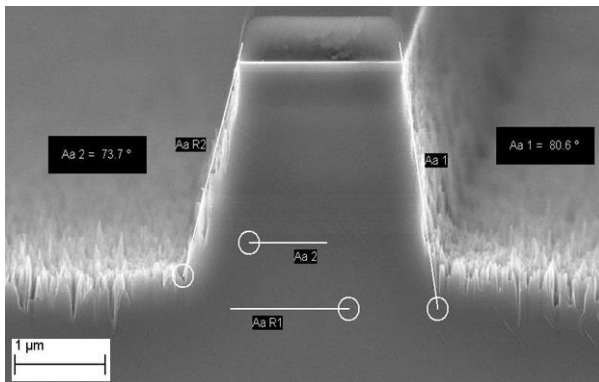


Рис. 1. Фотография СЭМ после травления Si_3N_4 при давлении в рабочей камере 1,5 Па.

Fig. 1. SEM photograph after etching Si_3N_4 at a pressure in the working chamber of 1.5 Pa

Из рисунка 1 видно, что при рабочем давлении в камере 1,5 Па на поверхности подложки наблюдается образование неровности. Повышение давления позволило снизить неровность, однако наблюдается образование углублений у нижней грани волновода и наклон стенок (рисунок 2). В результате экспериментов было выявлено, что для получения вертикальных стенок необходимо увеличивать *RIA* мощность, а оптимальное давление в камере составляет 3 Па. На рисунке 3 представлена фотография СЭМ при оптимальном режиме травления.

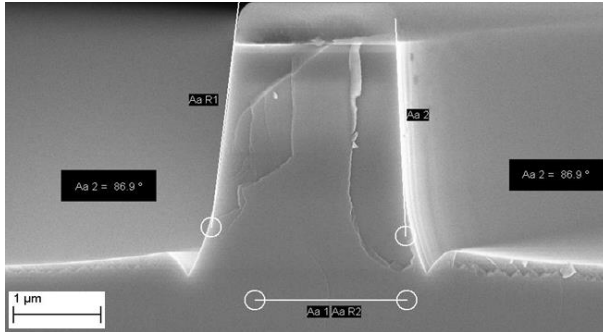


Рис. 2. Фотография СЭМ после травления волновода.

Fig. 2. SEM photograph after waveguide etching

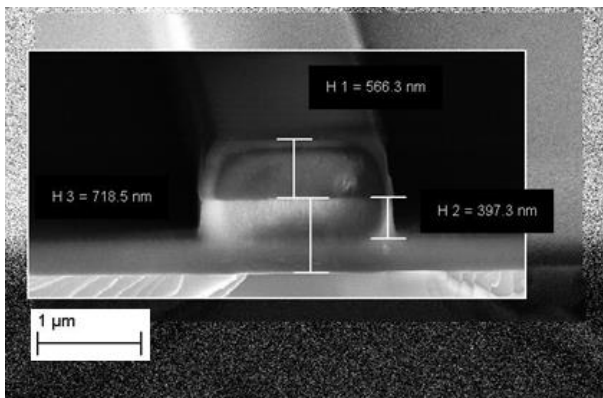


Рис. 3. Фотография СЭМ образца при оптимальном режиме травления.

Fig. 3. SEM photograph of the sample in the optimal etching mode

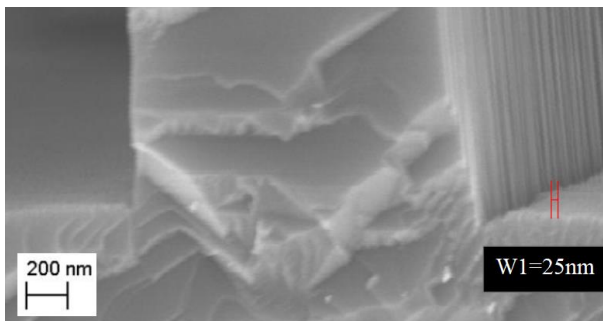


Рис. 4. Фотография СЭМ части волновода.

Fig. 4. SEM photograph of a part of the waveguide

На рисунке 4 представлена фотография области оптического волновода, отображающая шероховатость боковой стенки.

На рисунке 5 представлена фотография результатов измерения шероховатости поверхности пленки Si_3N_4 , проведенные на оптическом профилометре *Filmetrics Profil3D*.

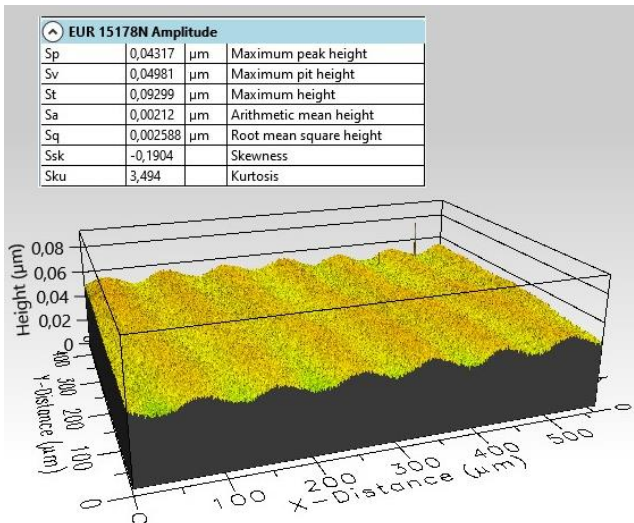


Рис. 5. Фотография результатов измерения шероховатости поверхности пленки Si_3N_4 .

Fig. 5. Photograph of the results of measuring the surface roughness of the Si_3N_4 film.

На основании проведенных измерений (рисунки 4, 5) можно делать вывод, что шероховатость поверхности пленки составляет менее 10 нм, шероховатость боковой границы волновода составляет не более 25 нм. В работах [1, 4] представлены исследования, что для длины волны 1,5 мкм шероховатость поверхности менее 250 нм не влияет на потери в волноводе, поэтому считаем, что, дальнейшее уменьшение шероховатости регулировкой техпроцесса не требуется.

Для регулирования напряженности пленки были проведены исследования влияния газовой смеси на напряженность. Согласно проведенному литературному обзору, управлением внутренними напряжениями пленки Si_3N_4 , полученной методом плазмохимического осаждения в индуктивно связанной плазме, осуществляется за счет добавления NH_3 . Для отработанного режима осаждения пленки Si_3N_4 измеренные внутренние напряжения составили 300 Па. Исследование влияния NH_3 показали, что для достижения внутренних напряжений равных 0 Па, поток газа NH_3 должен составлять 3 *sccm*.

Для ввода-вывода света [5], была рассчитана фазовая решетка, период которой составил 0,8 мкм, коэффициент заполнения 0,5. Для реализации фазовой решетки, проводилось травление волновода на глубину 150 нм через резистивную маску.

2. Заключение

Работа была направлена на разработку технологии формирования интегрально оптических волноводов на основе пленок Si_3N_4 , полученных методом плазмохимического осаждения. В результате были отработаны процессы формирования гребенчатых волноводов с вертикальными стенками и шероховатостью боковой грани менее 25 нм. Проведение измерения показали, что вносимые потери S_{21} полученной структуры оптического волновода составили $-0,1$ дБ/см.

Благодарности

Работы выполнены на оборудовании ЦКП «Импульс» ТУСУР. Отработка технологических режимов травления оптических волноводов выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10077. Расчеты геометрических размеров оптических волноводов проводились в рамках ГЗ НИОКТР № АААА-А19-119110690036-9.

Список литературы

1. Antelius M., Gylfason K. B., Sohlstrom H. An apodized SOI waveguide-to-fiber surface grating coupler for single lithography silicon photonics // Opt. Express. 2011. Vol. 19. P. 3592—3598.
2. Никоноров Н. В., Шандаров С. М. Волноводная фотоника : курс лекций. СПб : СПбГУ ИТМО, 2008. 143 с.
3. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design : from devices to systems. Cambridge : Cambridge University Press, 2015.
4. Гребенчатый Y-делитель на основе тонкопленочного нобата лития / И. В. Кулинич и др. // Наноиндустрия. 2020. Т. 13, № S5-2 (102). С. 370—374.
5. Обзор геометрических параметров решеточных элементов на основе материалов Si/SO₂ и Si₃N₄/SiO₂ / О. В. Тертишная и др. В сб. : Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. 2021. № 1-1. С. 37—41.

Информация об авторах

Кулинич Иван Владимирович, кандидат технических наук, научный сотрудник института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск.

Сомогонянц Алина Алексеевна, магистрант кафедры электронных приборов ТУСУР, инженер института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск.

Шестериков Евгений Викторович, начальник лаборатории «Радиофотоника» института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск. Директор НОЦ «Нанотехнологии» ТУСУР, г. Томск.

Моховиков Денис Максимович, магистрант кафедры физической электроники ТУСУР, инженер института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева РАН, г. Томск.

Integrated Optical Waveguides Based on Si_3N_4 Films

I. V. Kulinich^{1,2}, A. A. Somogonyants^{1,2},
E. V. Shesterikov^{1,2}, and D. M. Mokhovikov²

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics
40, prosp. Lenina, Tomsk, 634050, Russian Federation
kulinich@micran.ru

²Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuyeva SB RAS
1, Acad. Zuyev sq., Tomsk, 634055, Russian Federation

Received: May 20, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: The paper presents studies at developing a technology for the formation of a rib integrated optical waveguide based on a Si_3N_4 film. The effect of ICP deposition modes on the structure of SiO_2 and Si_3N_4 films and the effects of RIE etching of the waveguide on the rib profile and surface roughness are studied.

Keywords: PIC, phase grating, silicon nitride on insulator.

For citation (IEEE): I. V. Kulinich, A. A. Somogonyants, E. V. Shesterikov, and D. M. Mokhovikov, "Integrated Optical Waveguides Based on Si_3N_4 Films," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 3, pp. 318–324, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.3.23. (In Russ.).

Acknowledgements

The work was carried out on the equipment of TsKP "Impulse" TUSUR. Development of technological modes of etching of optical waveguides was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 21-79-10077. Calculations of the geometrical dimensions of optical waveguides were carried out in the framework of the GR NIOKTR No. AAAA-A19-119110690036-9.

References

- [1] M. Antelius, K. B. Gylfason, and H. Sohlström, "An apodized SOI waveguide-to-fiber surface grating coupler for single lithography silicon photonics," *Optics Express*, vol. 19, no. 4, p. 3592, Feb. 2011, doi: 10.1364/oe.19.003592.
- [2] N. V. Nikonorov and S. M. Shandarov, *Waveguide photonics: a course of lectures*, St. Petersburg: SPbGU ITMO, 2008. (In Russ.).
- [3] L. Chrostowski and M. Hochberg, *Silicon photonics design: from devices to systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, doi: 10.1017/CBO9781316084168.

- [4] I. V. Kulinich, A. A. Gulyaeva, E. V. Shesterikov, V. A. Dybov, and A. I. Kazimirov, “Comb Y-division based on thin-film lithium niobate,” *Nanoindustry Russia*, vol. 13, no. 5s, pp. 370–374, Dec. 2020, doi: 10.22184/1993-8578.2020.13.5s.370.374. (In Russ.).
- [5] O. V. Tertishnaya, I. V. Kulinich, A. A. Sogomyants, and A. A. Gulyaeva “Review of geometric parameters of lattice elements based on Si/SO₂ and Si₃N₄/SiO₂ materials, *Electronic means and control systems. Materials of reports of the International scientific-practical conference*, no. 1-1. pp. 37–41, 2021. (In Russ.).

Information about the authors

Ivan V. Kulinich, candidate of technical sciences, researcher at the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk, Russian Federation.

Alina A. Somogonyants, master student of the Department of Electronic Devices TUSUR, engineer at the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk, Russian Federation.

Evgeniy V. Shesterikov, head of the laboratory “Radiophotonics” of the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk. Director of REC “Nanotechnologies” TUSUR, Tomsk, Russian Federation.

Denis M. Mokhovikov, master student of the Department of Physical Electronics TUSUR, engineer at the Institute of Atmospheric Optics n. a. V. E. Zuev RAS, Tomsk, Russian Federation.