
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.7.068.4
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-6-469-476

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ФАКТОРОВ РОСТА ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Т. А. РАДЗИЕВСКАЯ^{1,2}, И. А. ЛАМКИН², С. А. ТАРАСОВ², Н. Н. ИВАНОВ³

¹ОАО „Авангард“, 195271, Санкт-Петербург, Россия,
E-mail: avangard@avangard.org

²Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), 197376, Санкт-Петербург, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 193232, Санкт-Петербург, Россия

Представлены технологические подходы к снижению поверхностных дефектов полимерных планарных оптических волноводов. Экспериментально определены и устранены факторы, способствующие увеличению числа поверхностных дефектов при использовании технологии мягкой литографии. Показана эффективность применения светофильтра оригинальной конструкции.

Ключевые слова: полимерные планарные оптические волноводы, мягкая литография, мастер-штамп, PDMS, SU-8, отрицательный наклон стенок фоторезиста, потери на рассеяние

Введение. Увеличить пропускную способность объединительных печатных плат можно, заменив сравнительно медленные электрические проводники оптическими межсоединениями [1]. В настоящее время особую актуальность приобретают исследования в области создания устройств интегральной оптики, в которых реализуется передача данных по планарным оптическим волноводам [2]. Традиционно устройства интегральной оптики выполняются из полупроводниковых материалов [2]. Однако устройства полупроводниковой интегральной оптики имеют ограничения, связанные с увеличением потерь сигнала вследствие внутренних напряжений материала под воздействием повышенной температуры [3].

Использование полимерных материалов также позволяет достичь увеличения пропускной способности межсоединений [3, 4]. Полимеры обеспечивают необходимое согласование температурного коэффициента линейного расширения с материалом печатной платы, а технологии формирования полимерных планарных оптических волноводов совместимы с классическими технологиями производства печатных плат [5, 6]. Критическим недостатком полимерных материалов является сравнительно высокие потери сигнала.

В настоящей работе рассмотрены подходы к снижению потерь на рассеяние оптического излучения путем доработки технологического процесса формирования мастер-штампа полимерных планарных оптических волноводов.

Материалы и технология формирования полимерных планарных оптических волноводов. В рамках исследования в Центре микросистемотехники АО „НИТИ «Авангард»“

доработан технологический процесс изготовления макета полимерных планарных оптических волноводов (см. таблицу).

Основные параметры макета полимерных планарных оптических волноводов

| Параметр | | Значение |
|--|------------|----------|
| Показатель преломления | Оболочка | 1,404 |
| | Сердцевина | 1,41 |
| Соотношение смеси полимер/отверждающий агент | Оболочка | 20:1 |
| | Сердцевина | 5:1 |
| Высота, мкм | Оболочка | 40 |
| | Сердцевина | 50 |
| Общая высота планарного волновода, мкм | | 130 |
| Длина волны оптического излучения, нм | | 850 |

В качестве материала сердцевины и оболочки оптического волновода выбран неспециализированный полимер общего применения полидиметилсилоксан (ПДМС, PDMS). Зависимость значения показателя преломления полимера PDMS от соотношения двух входящих в его состав компонентов (полимерной основы и связующего агента) позволила применить PDMS в соотношении 5:1 в качестве сердцевины полимерного планарного оптического волновода и PDMS в соотношении 10:1 — в качестве оболочки оптического волновода [7].

PDMS широко применяется при изготовлении изделий микрофлюидики, например, микроканалов [8], которые, в свою очередь, конструктивно схожи с планарными оптическими волноводами. Следовательно, технологии изготовления полимерных микрофлюидных микроканалов позволяют формировать полимерные планарные оптические волноводы. В качестве наиболее подходящей выбрана технология мягкой литографии — подвид наноприпной литографии [9], отличающийся использованием „мягкого“ полимерного штампа, сформированного путем оттиска (импринта) „жесткого“ мастер-штампа. PDMS традиционно используется в качестве материала для мягкого штампа. В настоящем исследовании фоторезист на эпоксидной основе SU-8 MicroChem применялся для изготовления мастер-штампа путем прямой фотолитографии.

Вследствие изготовления изделия одновременно из двух полимерных материалов (PDMS сердцевины и PDMS оболочки) изменена традиционная технология мягкой литографии (рис. 1). На поверхность мастер-штампа наносился PDMS в соотношении 5:1 для сердцевины оптических волноводов, затем наносился второй слой PDMS в соотношении 20:1 для нижней оболочки, к неотвержденной оболочке прижималось печатное основание, после отверждения изделие извлекалось из мастер-штампа.

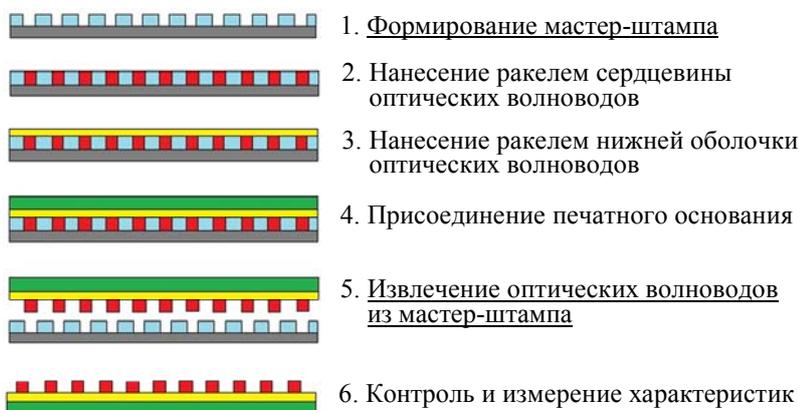


Рис. 1

Контроль изделий, сформированных по предложенному технологическому процессу, выявил множественные поверхностные дефекты элементов полимерных планарных оптических

ских волноводов. При анализе причин возникновения поверхностных дефектов выдвинуто предположение, что наиболее критичной операцией является извлечение волновода из мастер-штампа.

К негативным эффектам при извлечении относятся избыточная и неравномерная адгезия полимерного материала к мастер-штампу, а также отрицательный наклон боковых стенок мастер-штампа (T-topping). Цель последующей обработки технологического процесса заключалась в устранении причин возникновения этих эффектов.

Способ снижения адгезии полимерного материала к мастер-штампу. Неравномерность адгезии полимера к мастер-штампу определялась наличием трех видов контактов полимера с разными значениями адгезии [10]. В результате добавления подслоя устранен контакт PDMS сердцевины с основанием мастер-штампа. Параметры технологического процесса изготовления мастер-штампа (рис. 2) доработаны с учетом появления подслоя и необходимости обеспечить надежное его сшивание с основным слоем SU-8.

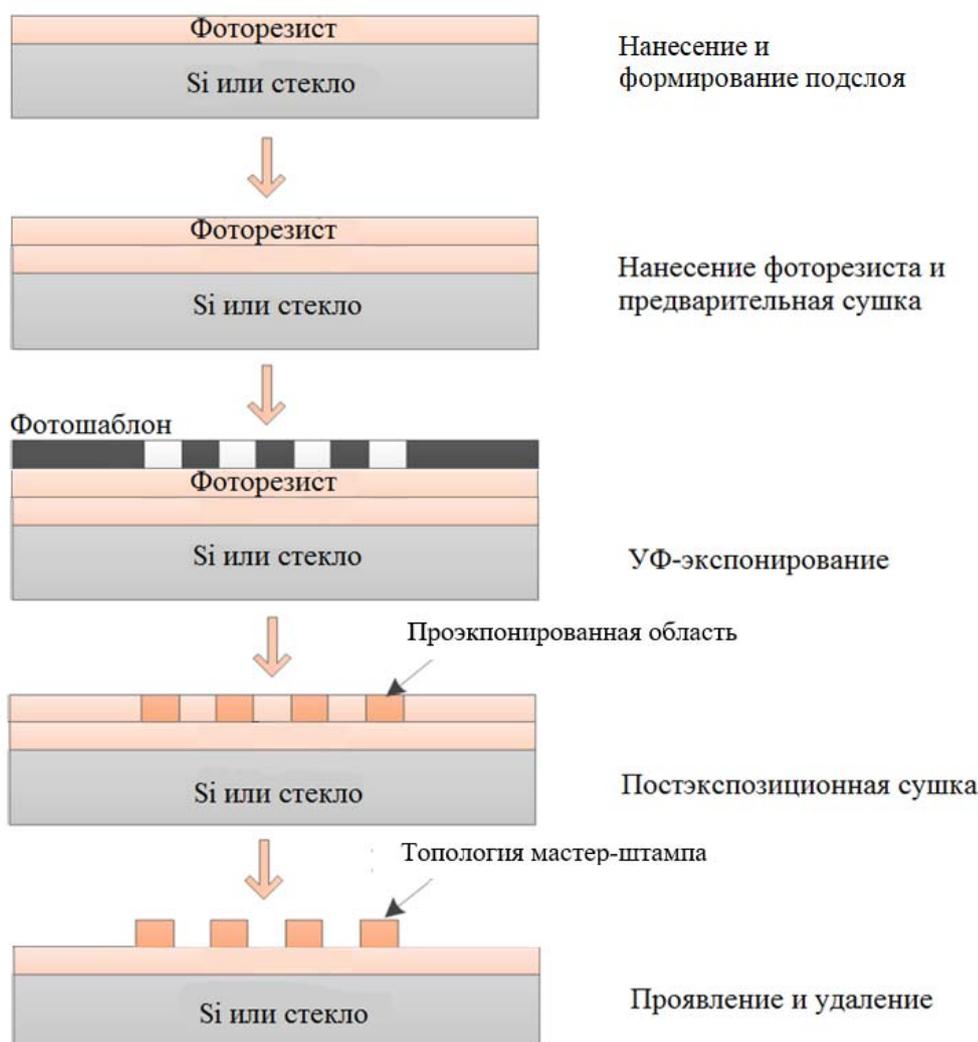


Рис. 2

Для определения оптимальной мощности экспонирующего излучения при формировании двуслойного мастер-штампа тестовая пластина последнего разделена на четыре сектора, на каждый из которых воздействовали УФ-излучением различной мощности. Полученная оптимальная мощность экспонирующего УФ-излучения в два раза превысила теоретически рассчитанную. Следует отметить, что получаемая эмпирически величина мощности излучения требует постоянной отработки и корректировки.

Для надежного сшивания слоя и подслоя в двуслойном мастер-штампе и исключения внутренних напряжений режимы сушки и задубливания доработаны путем снижения скорости изменения температуры нагревательной плиты при ее нагреве и охлаждении. Дополнительно добавлен этап обработки поверхности мастер-штампа модификатором адгезии гексаметилдисилазаном (ГМДС, HMDS) непосредственно перед нанесением полимера в мастер-штамп.

Способ устранения отрицательного наклона стенок мастер-штампа. Негативный фоторезист SU-8 характеризуется отрицательным наклоном стенок фоторезистивной маски. Как следует из ряда публикаций [11, 12], причиной возникновения T-topping является избыточное поглощение УФ-излучения с длиной волны менее 350 нм в приповерхностном слое фоторезиста SU-8 (рис. 3). При этом происходит переэкспонирование приповерхностного слоя и недоэкспонирование нижних слоев фоторезиста. Соль триарилсульфония гексафтороантимоната, которая входит в состав SU-8 в качестве фотокислотного генератора (ФКГ), имеет максимумы поглощения оптического излучения на длинах волн 231,5; 268,5 и 276 нм [12]. Поэтому при экспонировании широкополосным УФ-излучением, включающим длины волн менее 350 нм, происходит генерация избыточной концентрации кислоты Льюиса. Эта кислота диффундирует сквозь боковые стенки проэкспонированного фоторезиста и полимеризует тонкий приповерхностный слой фоторезистивной пленки.

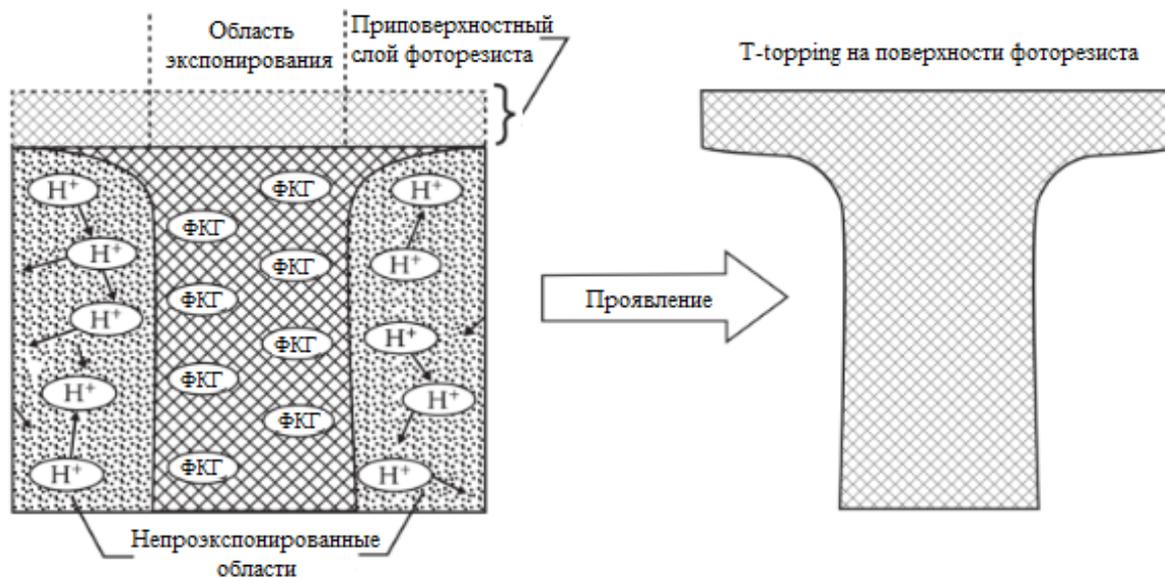


Рис. 3

Повышение вертикальности стенок фоторезиста SU-8 обеспечивается применением специализированных светофильтров. Выдвинуто предположение, что использование светофильтра в виде стеклянной подложки с предварительно нанесенным слоем SU-8 также будет способствовать уменьшению влияния коротковолновой части спектра и, следовательно, борьбе с T-topping [10].

Для проверки эффективности светофильтра оригинальной конструкции новая тестовая пластина мастер-штампа разделена на секторы и проэкспонирована при различных мощностях УФ-излучения с учетом использования светофильтра.

На рис. 4 приведены тестовые топологии двуслойного мастер-штампа (РЭМ-изображение поперечного сечения): *а* — сформированные при ранее определенной оптимальной мощности экспонирования; *б* — сформированные с применением светофильтра. Из рис. 4, *а* очевидно присутствие T-topping в структуре двуслойного мастер-штампа. При экспонировании указанного сектора использовалась ранее полученная оптимальная мощность УФ-излучения без применения светофильтра.

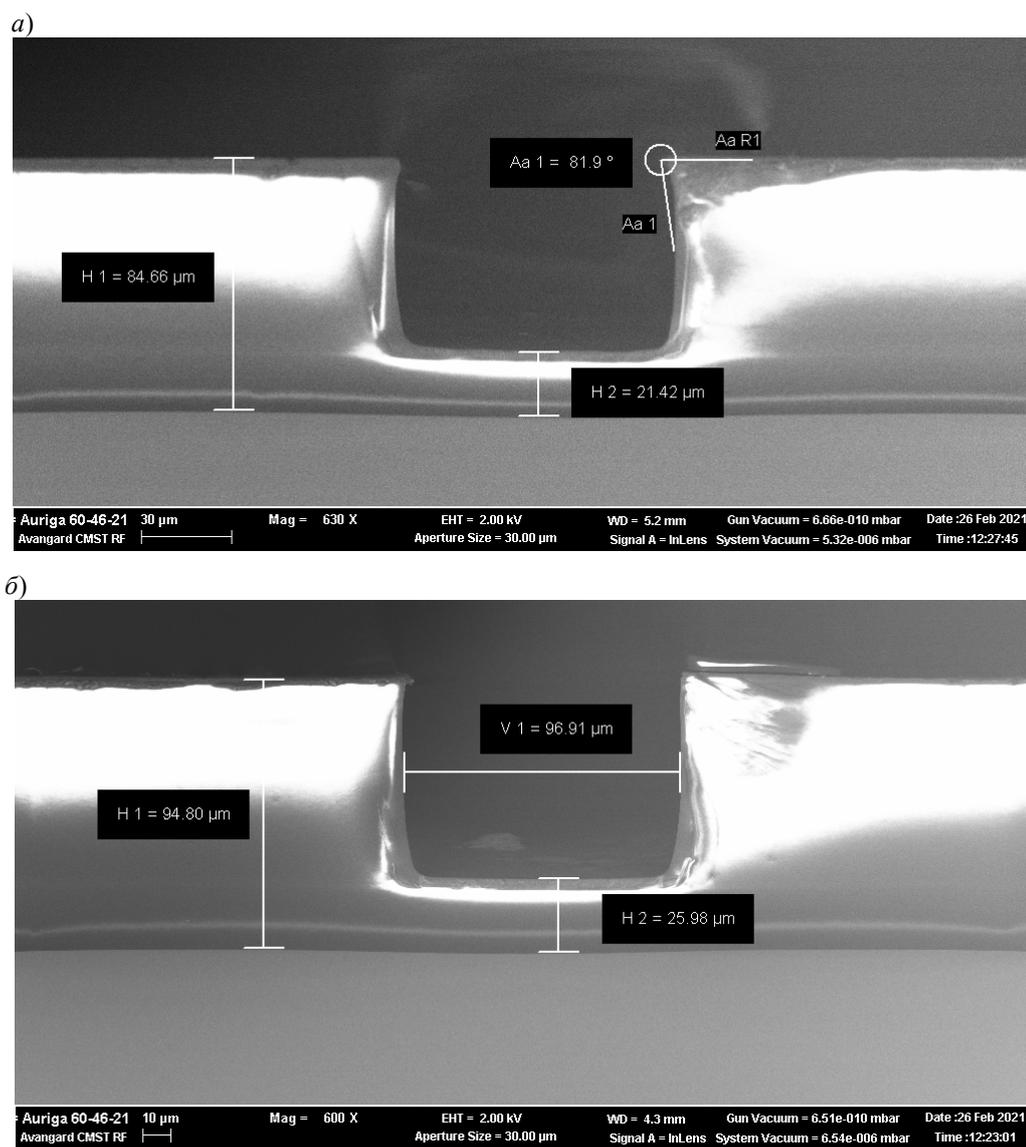


Рис. 4

На рис. 4, б отсутствуют следы T-topping. Этот сектор мастер-штампа экспонировался при мощности УФ-излучения, увеличенной еще в 1,4 раза по сравнению с ранее определенным оптимальным значением, и при использовании светофильтра оригинальной конструкции.

Обсуждение результатов исследования. Добавление подслоя и обработка HDMS снимут проблему избыточной и неравномерной адгезии полимерного материала к мастер-штампу. Помимо устранения отрицательного наклона стенок мастер-штампа создаются необходимые условия для бездефектного извлечения из него полимерных планарных оптических волноводов. Следовательно, экспериментально полученные результаты доработки технологического процесса позволяют прогнозировать уменьшение поверхностных дефектов полимерных планарных оптических волноводов.

При этом известно [13—15], что поверхностные дефекты во многом определяют величину потерь на рассеяние в оптических волноводах. Значит, вносимые в технологический процесс изменения и дополнения обеспечат сокращение потерь в полимерных планарных оптических волноводах.

Заключение. Таким образом, в результате проведенного экспериментального исследования технологического процесса выявлена уязвимая операция извлечения из мастер-штампа полимерных планарных оптических волноводов, определены факторы, приводящие к увеличению числа поверхностных дефектов на этой операции. К подобным факторам относятся

избыточная и неравномерная адгезия полимера к мастер-штампу, а также возникновение отрицательного наклона боковых стенок мастер-штампа.

Применение дополнительного слоя фоторезиста в сочетании с модификатором адгезии препятствует образованию поверхностных дефектов из-за равномерной адгезии полимера к поверхности мастер-штампа. Также за счет снижения адгезии после извлечения сохраняется целостность поверхности мастер-штампа, что позволяет повторно использовать мастер-штамп при изготовлении полимерных планарных оптических волноводов идентичной топологии и, как следствие, снизить затраты на их производство.

Подтверждена возможность замены дорогостоящего специализированного светофильтра светофильтром оригинальной конструкции. Использование предложенного светофильтра успешно устраняет эффект отрицательного наклона боковых стенок мастер-штампа (T-topping). Отсутствие T-topping также способствует более легкому и бездефектному извлечению полимерных планарных оптических волноводов из мастер-штампа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям (Договор № 14376ГУ/2019 от 11.07.2019 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахманов А. С.* Оптическая передача информации в супер-ЭВМ и микропроцессорных системах. Ч. 1 // LIGHTWAVE. 2008. № 3. С. 46—53.
2. *Miller S. E.* Integrated Optics: An Introduction // Bell System Technical Journal. 1969. Vol. 48, is. 7. P. 2059—2069. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x.
3. *Cai D.* Optical and mechanical aspects on polysiloxane based electrical-optical-circuits-board: Doct. thesis. Dortmund, 2008. 129 p. DOI: 10.17877/DE290R-8242.
4. *Cai D.* Polydimethylsiloxane (PDMS) based optical interconnect with copper-clad FR4 substrates // Sensors and Actuators B: Chemical. 2011. Vol. 160, is. 1. P. 777—783. DOI: 10.1016/j.snb.2011.08.062.
5. *Prajzler V., Neruda M., Nekvindova P.* et al. Properties of Multimode Optical Epoxy Polymer Waveguides Deposited on Silicon and TOPAS Substrate // Radioengineering. 2017. Vol. 26, N 1. P. 10—15. DOI: 10.13164/re.2017.0010.
6. *Immonen M.* Fabrication and Characterization of Polymer Optical Waveguides With Integrated Micromirrors for Three-Dimensional Board-Level Optical Interconnects // IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing. 2005. Vol. 28, is. 4. P. 304—311. DOI: 10.1109/TEPM.2005.856538.
7. *Cai Z., Qiu W., Shao G.* et al. A new fabrication method for all-PDMS waveguides // Sensors and Actuators A: Physical. 2013/ Vol. 204. P. 44—47. DOI: 10.1016/j.sna.2013.09.019.
8. *Sergeeva E.* Fabrication of polymer-based optofluidic microsystems for optical fluid analysis on printed circuit boards: thesis for Dr.-Ing. Universität Rostock, Rostock, 2019. 143 p.
9. *Zhou W.* Nanoimprint Lithography: An Enabling Process for Nanofabrication. Berlin—Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 269 p. DOI: 10.1007/978-3-642-34428-2.
10. *Радзиевская Т. А., Иванов Н. Н., Тарасов С. А.* Подходы к снижению потерь на рассеяние в полимерных планарных оптических волноводах // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7, № 1. С. 45—59. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-45-59.
11. *Madou M. J.* Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology. 3rd ed. USA, Irvine: CRC Press, 2011. 1992 p. DOI: 10.1201/9781315274164.
12. *Mitra S. K.* Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications. USA, Irvine: CRC Press, 2011. 624 p. DOI: 10.1201/b11188.
13. *Ma H., Jen A. K.-Y., Dalton L. R.* Polymer-Based Optical Waveguides: Materials, Processing, and Devices // Advanced Materials. 2002. Vol. 14, is. 19. P. 1339—1365. DOI: 10.1002/1521-4095(20021002)14:19<1339::AID-ADMA1339>3.0.CO;2-O.

14. *Освицкий А. Н.* Интегральный подход к измерению параметров шероховатости поверхности по рассеянию света в диэлектрических волноводах // *Радиотехника и электроника*. 2011. Т. 56, № 1. С. 43—47.
15. *Даниленко С. С.* Оценка потерь в оптических пленочных волноводах с шероховатыми границами и поглощением. // *Вестн. РУДН. Сер. Математика. Информатика. Физика*. 2013. Вып. 1. С. 141—147.

Сведения об авторах

- Тамара Александровна Радзиевская** — ОАО „Авангард“, Центр микросистемотехники; инженер-технолог; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина) кафедра фотоники; аспирант; E-mail: tamaramanvelova239@mail.ru
- Иван Анатольевич Ламкин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), кафедра фотоники; E-mail: ialamkin@mail.ru
- Сергей Анатольевич Тарасов** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), департамент науки; директор; кафедра фотоники; заведующий кафедрой; E-mail: satarasov@mail.ru
- Николай Николаевич Иванов** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, институт магистратуры; зам. директора по научной работе; E-mail: ivanov.2nik@yandex.ru

Поступила в редакцию
08.04.2021 г.

Ссылка для цитирования: *Радзиевская Т. А., Ламкин И. А., Тарасов С. А., Иванов Н. Н.* Технологические способы снижения факторов роста поверхностных дефектов полимерных планарных оптических волноводов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2021. Т. 64, № 6. С. 469—476.

TECHNOLOGICAL METHODS FOR REDUCING THE GROWTH FACTORS OF SURFACE DEFECTS IN POLYMER PLANAR OPTICAL WAVEGUIDES

T. A. Radzievskaya^{1,2}, I. A. Lamkin², S. A. Tarasov², N. N. Ivanov³

¹Avangard JSC, 195271, St. Petersburg, Russia,
E-mail: avangard@avangard.org

²St. Petersburg Electrotechnical University), 197376, St. Petersburg, Russia

³The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications, 193232, St. Petersburg, Russia

Several technological approaches to reduction of surface defects in polymer planar optical waveguides are presented. Experimental studies are shown to reveal and eliminate the factors contributing to an increase in the number of surface defects when using soft lithography technology. The efficiency of using a specially designed light filter is demonstrated.

Keywords: polymer planar optical waveguides, soft lithography, master stamp, PDMS, SU-8, negative tilt of the photoresist walls, scattering losses

REFERENCES

1. Akhmanov A.S. *LIGHTWAVE*, 2008, no. 3, pp. 46–53. (in Russ.)
2. Miller S.E. *Bell System Technical Journal*, 1969, no. 7(48), pp. 2059–2069, DOI: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x.
3. Cai D. *Optical and mechanical aspects on polysiloxane based electrical-optical-circuits-board*. Doct. thesis. Dortmund, 2008. 129 p., DOI: 10.17877/DE290R-8242.
4. Cai D. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, no. 1(160), pp. 777–783, DOI: 10.1016/j.snb.2011.08.062.
5. Prajzler V., Neruda M., Nekvindova P. et al. *Radioengineering*, 2017, no. 1(26), pp. 10–15, DOI: 10.13164/re.2017.0010.
6. Immonen M. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2005, no. 4(28), pp. 304–311, DOI: 10.1109/TEPM.2005.856538.
7. Cai Z., Qiu W., Shao G. et al. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 204, pp. 44–47, DOI: 10.1016/j.sna.2013.09.019.

8. Sergeeva E. *Fabrication of polymer-based optofluidic microsystems for optical fluid analysis on printed circuit boards*: Thes. Dr.-Ing., Universität Rostock, Rostock, 2019, 143 p.
9. Zhou W. *Nanoimprint Lithography: An Enabling Process for Nanofabrication*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2013, 269 p., DOI: 10.1007/978-3-642-34428-2.
10. Radzievskaya T.A., Ivanov N.N., Tarasov S.A. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2021, no. 1(7), pp. 45–59, DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-1-45-59.
11. Madou M.J. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology*, 3rd ed. USA, Irvine, CRC Press, 2011, 1992 p., DOI: 10.1201/9781315274164.
12. Mitra S.K. *Microfluidics and nanofluidics handbook: Fabrication, implementation, and applications*, USA, Irvine, CRC Press, 2011, 624 p., DOI: 10.1201/b11188.
13. Ma H., Jen A.K.-Y., Dalton L.R. *Advanced Materials*, 2002, no. 19(14), pp. 1339–1365, DOI: 10.1002/1521-4095(20021002)14:19<1339::AID-ADMA1339>3.0.CO;2-O.
14. Osovitskii A.N. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2011, no. 1(56), pp. 35–38.
15. Danilenko S.S., Osovitskii A.N. *Vestnik RUDN. Seriya Matematika. Informatika. Fizika*, 2013, no. 1, pp. 141–147. (in Russ.)

Data on authors

- Tamara A. Radzievskaya** — JSC Avangard, Microsystems Engineering Center; Process Engineer; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Photonics; Post-Graduate Student; E-mail: tamaramanvelova239@mail.ru
- Ivan A. Lamkin** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Photonics; E-mail: ialamkin@mail.ru
- Sergey A. Tarasov** — Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Science; Director; Department of Photonics; Head of the Department; E-mail: satarasov@mail.ru
- Nikolay N. Ivanov** — Dr. Sci.; The Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications, Institute of Magistracy; Deputy Director for Research; E-mail: ivanov.2nik@yandex.ru

For citation: Radzievskaya T. A., Lamkin I. A., Tarasov S. A., Ivanov N. N. Technological methods for reducing the growth factors of surface defects in polymer planar optical waveguides. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 6. P. 469–476 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-6-469-476