

Моделирование ввода излучения в плоские линейные волноводы с помощью дифракционных решёток для новой технологии изготовления волноводных систем

В.С. Соловьёв¹, С.П. Тимошенко¹, А.С. Тимошенко¹, А.И. Виноградов¹, Н.М. Кондратьев², Н.А. Расцепкина³
¹ «Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Россия,
² Российский квантовый центр «ООО МЦКТ», г. Москва, д. Сколково, Россия,
³ Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия

Аннотация

Произведено моделирование и выбор оптимальных параметров дифракционной решётки для новой разработанной технологии изготовления плоских волноводных систем. В отличие от использования готовых пластин «кремний на изоляторе», разработана новая технология изготовления полностью автономной системы ввода излучения, согласующего элемента и собственно волновода. Приведено общее описание технологии системы «ввод излучения – распространение – вывод излучения». Найдены конкретные технологические параметры высоты решётки, подстилающего и покровного слоёв. Эффективность ввода в волновод составила 30% за счёт подбора оптимального расстояния от волновода до кремниевой подложки, которая работает как зеркальный слой.

Ключевые слова: линейный волновод, кольцевой резонатор, ввод излучения, волноводная структура, WGM-резонатор, дифракционная решётка.

Цитирование: Соловьёв, В.С. Моделирование ввода излучения в плоские линейные волноводы с помощью дифракционных решёток для новой технологии изготовления волноводных систем / В.С. Соловьёв, С.П. Тимошенко, А.С. Тимошенко, А.И. Виноградов, Н.М. Кондратьев, Н.А. Расцепкина // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 917-922. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-718.

Citation: Soloviev VS, Timoshenkov SP, Timoshenkov AS, Vinogradov AI, Kondratiev NM, Raschepkina NA. Modeling the input of radiation into plane linear waveguides using diffraction gratings for a new technology for the manufacture of waveguide systems. Computer Optics 2020; 44(6): 917-922. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-718.

Введение

В настоящее время развивается сфера микроэлектромеханических систем, основной целью которой является разработка и производство прецизионных датчиков различных физических величин.

Использование микроэлектромеханических систем (МЭМС) не всегда возможно из-за жёстких требований к надёжности во взрывоопасных условиях и при измерении физических величин на объектах, движущихся с большими ускорениями. В связи с этим активно развиваются микрооптические электромеханические системы (МОЭМС), обеспечивающие более широкий спектр использования и обладающие преимуществами перед МЭМС.

Так называемые WGM-резонаторы (резонаторы на модах шепчущих галерей) давно известны, но стали исследоваться и применяться в оптике только в последнее десятилетие, так как появилась возможность их технологического изготовления с помощью методов электронной техники. Использование WGM-резонаторов представляет большой интерес для развития МОЭМС, изготовления фильтров, линий задержек, датчиков, детекторов. Для использования WGM-резонаторов необходима технология ввода излучения. Ввод излучения в плоские волноводы при-

ведён в работах [1–8], [15–17]. Ввод излучения при сближении плоских и кольцевых волноводов осуществлён в [9–14]. В предлагаемой работе рассматривается технология ввода излучения в плоские волноводы и приводятся конкретные расчёты параметров слоёв и дифракционных решёток для её реализации.

1. Технология ввода излучения в волновод через дифракционную решётку

Технология изготовления волноводов и WGM-резонаторов, к сожалению, привязана к стандартным пластинам «кремний на изоляторе» (*silicon-on-insulator*, SOI). Эти пластины дороги, и для их использования в некоторых случаях, например, ввод излучения в волновод с помощью дифракционной решётки, их придется дорабатывать, напыляя слои для ввода большей толщины. Изготовление нестандартных волноводных систем требует нестандартной технологии. Для изготовления волновода и дифракционной решётки, с помощью которой вводится излучение, надо изготавливать слои разной толщины в едином технологическом цикле. Для дифракционной решётки необходимая толщина слоя, как правило, намного больше, чем толщина волноводного слоя.

Прямой ввод излучения в волноводную структуру в случае плоских волноводов при толщине волновода

порядка микрона практически не реализуем с точки зрения дифракционных ограничений, т.к. длина волны больше толщины волновода и составляет 1,5 мкм. Прямой ввод в торец волновода используют обычно в толстых волноводных системах толщиной порядка 6 мкм, сделанных по методу ионного обмена.

Ввод излучения с помощью призмы тоже крайне затруднителен, т.к. требует в стандартном технологическом процессе микроэлектронной техники применения неспецифических операций вклеивания микропризм, организации зазора между призмой и волноводом и в связи с этим очень сложной операции оптической юстировки каждого волноводного сочленения.

Метод ввода излучения в волноводную структуру с помощью дифракционной решётки намного проще. Для этого необходимо подвести световод к волноводу под расчётным углом, например, 30°, с точностью, не требующей прецизионных устройств, и направить свет, выходящий из световода, на широкую часть сходящегося волновода. Все операции могут быть выполнены под микроскопом с увеличением не более 40.

Есть некоторые особенности ввода с помощью дифракционной решётки, которые заключаются в следующем: чтобы технологически было проще попасть в волновод, делается расширение волновода от 5 мкм до размера порядка 50 мкм, с углом расходимости от волновода менее 2°, и на конце этого рупорообразного волновода изготавливается дифракционная решётка, которая занимает не более 20% от длины рупора. Решётка в первом порядке дифракции направляет излучение в сходящийся волновод, который плавно переходит в рабочий волновод (рис. 1).

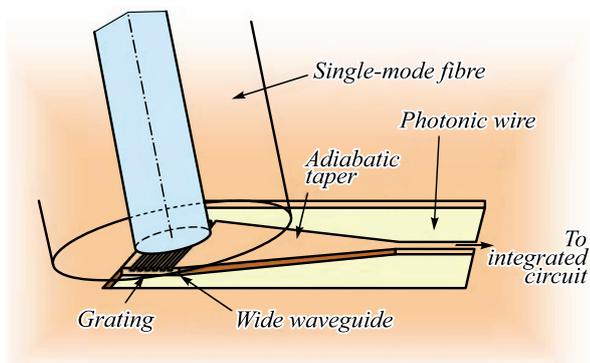


Рис. 1. Схема ввода излучения в волновод при помощи дифракционной решётки [1]

Из-за сложности технологического процесса изготовления дифракционной решётки на краю волновода, а также сложности согласования переходной зоны между дифракционной решёткой и волноводом очень мало работ посвящено этой теме.

Много работ посвящены применению и расчёту резонаторов на модах шепчущей галереи [10–17]. Технологически волноводные системы в основном изготавливаются на основе кремния, нитрида кремния и двуоксида кремния [1–17]. На нитриде кремния по стандартной технологии затруднительно изгото-

вить волноводы с толщиной выше 200 нм. Это связано с существенной разницей в коэффициентах расширения этих материалов. Например, при нанесении нитрида кремния толщиной более 200 нм на кремниевую подложку последняя просто начинает деформироваться и из плоской принимает выпуклую шарообразную форму. Нами отработана нестандартная технология нанесения различных волноводных слоёв на кремниевые и кварцевые подложки при низких температурах порядка 200°С. Толщины слоёв не ограничены по толщине.

В настоящей статье для этой технологии рассчитаны волноводы, которые будут изготавливаться на кварцевых и кремниевых подложках.

Для 2D-случая были рассчитаны решётки для двух толщин покровных слоёв на ядре волновода: 1 мкм и 3 мкм. Была рассчитана только бинарная структура решётки. Пилообразная структура, где оптимальная высота получается при фазовом набеге через структуру решётки на длину волны λ , пока не рассчитывалась. Теоретически такая решётка может дать эффективность порядка 90%. Пилообразная решётка будет выполняться в следующих проектах, и для неё, если использовать плавный кварц, необходима высота покровного слоя над волноводом порядка 3 мкм. Так что выводы, сделанные далее, относятся только к простой бинарной решётке. Также были проанализированы промежуточные значения толщин для бинарной структуры.

2. Решётка, создаваемая в покровном слое толщиной 1 мкм

Расчёты дифракционной решётки для 2D-случая велись в программе Comsol. Все расчёты проводились для длины волны света 1,5 мкм. Структура волновода с дифракционной решёткой на концах представляла трёхслойную волноводную систему. Тонкий волноводный слой толщиной 70 нм, изготовленный из нитрида кремния Si_3N_4 , снизу и сверху которого находится плавный кварц. Снизу от волноводящего слоя имеем кремниевую подложку с высоким качеством полировки, со средней шероховатостью порядка 0,5 нм, сверху – напылённый магнетронным способом слой плавного кварца, в котором создаётся дифракционная решётка. При моделировании выбирались параметры толщины нижнего слоя 1–3 мкм, так как изготовить слой плавного кварца на подложке из кремния более 1 мкм составляет определённую проблему из-за разных коэффициентов термического расширения кремния и кварца. У кварца коэффициент линейного расширения в 5 раз меньше, чем у кремния. При технологических температурах нанесения кварца на кремний свыше 500 градусов Цельсия становятся понятными технологические проблемы. При слоях плавного кварца более 1 мкм на кремниевой подложке толщиной 500 мкм происходит выгибание подложки за счёт её стяжки слоем кварца.

Параметры задавались так, как показано в табл. 1. Структура волновода описана сверху вниз, от воздуха до кремниевой подложки. Оптимальная высота решётки составила 0,8 мкм.

Табл. 1. Параметры модели дифракционной решётки

	Показатель преломления	Толщина слоя
Воздух	1	–
Покрытие SiO ₂	1,45	~1 мкм
Ядро Si ₃ N ₄	2	70 нм
Покрытие SiO ₂	1,45	0,9–3 мкм
Подложка Si	3,66	500 мкм

Волноводный слой по расчётам надо наносить на кремниевую подложку с промежуточным слоем из плавленого кварца 900 нм. На рис. 2 по оси абсцисс вправо от нуля показана коррекция увеличения периода решетки, 1 соответствует 0,1 мкм, влево – уменьшение периода решетки. Из расчётов, показанных на рис. 2, мы видим, что оптимальный угол падения луча на решётку лежит в районе 17... 23 градуса либо в районе 27... 35 градусов. Угол падения в 27... 35 градусов более предпочтителен, т.к. расширяются пределы технологических погрешностей периода дифракционной решётки. В последнем случае он составляет примерно 50 нм. Тогда как в первом случае, при падении луча в 17... 23 градуса, погрешность изменения периода решётки не должна превышать 10 нм.

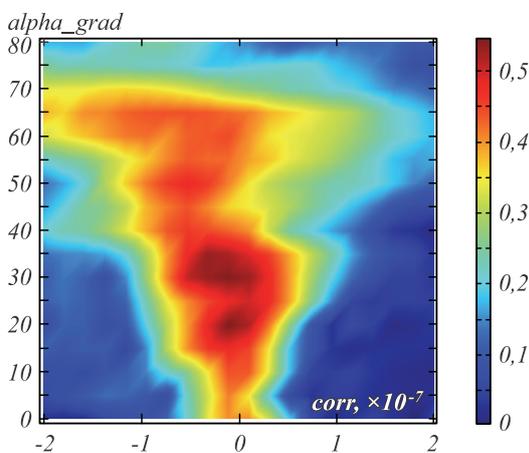


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности решётки высотой 0,8 мкм для вводимого излучения в волновод от угла падения и периода решётки. По оси абсцисс метры $\times 10^{-7}$, по оси ординат – угол падения в градусах. Период решётки 1609 нм (на графике – 0). Толщина подстилающего слоя между подложкой и волноводом – 900 нм

Распределение электрического поля показано на рис. 3. На рисунке видно, что при падении сверху на решётку световой волны происходит увеличение мощности последней при рассмотрении справа налево. Размерность по осям абсцисс и ординат – мет-

ры $\times 10^{-5}$. Вверху рисунка показана напряженность электромагнитного поля в $\text{в/м} \times 10^{-4}$. На конце решетки, с левой стороны, видно, что излучение уже входит в ядро волновода – структура с большой амплитудой.

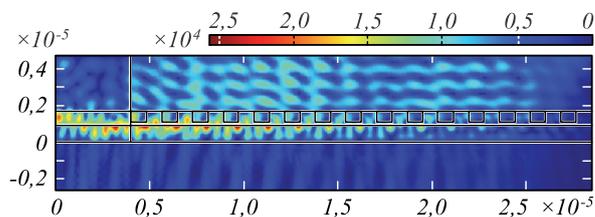


Рис. 3. Концентрация световой волны $\text{в/м} \times 10^{-4}$ и ввод её в волновод дифракционной решёткой. По оси абсцисс и ординат – расстояние в метрах $\times 10^{-5}$. По мере продвижения волны по решетке концентрация поля увеличивается

Из рис. 2 видно, что эффективность равна квадрату амплитуды отношения электромагнитного поля, вошедшего в волновод, к падающему на дифракционную решётку и равно $0,55^2 = 0,303$. Т.е составляет 30%. Это довольно большая эффективность вводимого излучения в столь тонкий волновод (ядро 70 нм). В торец такого тонкого волновода излучение ввести невозможно. Технология ввода в торец волновода применяется в толстых волноводах толщиной порядка 6 мкм, изготовленных по ионообменным технологиям.

3. Анализ эффективности решётки при изменении толщины подстилающего слоя от 1 до 3 мкм

Были проанализированы зависимость эффективности ввода от толщины подстилающего слоя «окись кремния – субстрат», на котором лежит волноводный слой. На рис. 4 показаны несколько расчётных максимумов поля в зависимости от толщины подстилающего под волноводом слоя от 1 до 3 мкм.

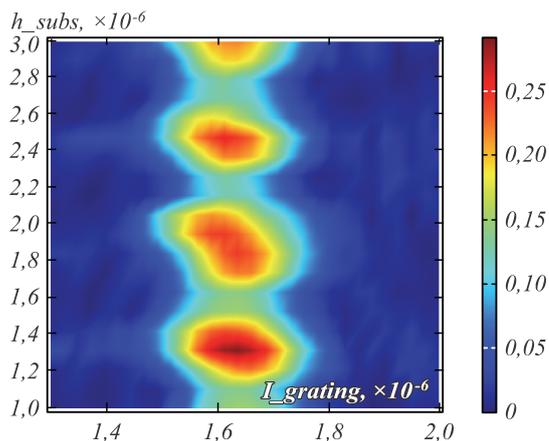


Рис. 4. Зависимость эффективности ввода излучения от периода решётки и толщины субстрата – нижнего слоя, на котором лежит волноводный слой. По оси абсцисс период в микронах, по оси ординат толщина слоя в микронах

На рисунке видно, что в области просчитанных толщин существует 4 оптимальных толщины – 1,3 мкм,

1,8... 2 мкм, 2,45 мкм, 3 мкм, а также то, что при увеличении толщины слоя эффективность ввода падает. Наилучшей является толщина 1,3 мкм. При этом при технологических отклонениях высоты от 1,21 до 1,41 эффективность ввода будет меняться в пределах 25... 30%. Допустимое изменение периода решётки составляет 1,55... 1,7 мкм.

4. Решётка, создаваемая в покровном слое толщиной 3 мкм

На рис. 5 в укрупнённом виде показано, как влияет толщина слоя покрытия, т.е. верхнего слоя двуокиси кремния над ядром волновода и высоты вытравленной решётки на эффективность ввода. Видно, что максимум достигается при толщине кладдинга 3,25 мкм и высоте решётки 3,05 мкм.

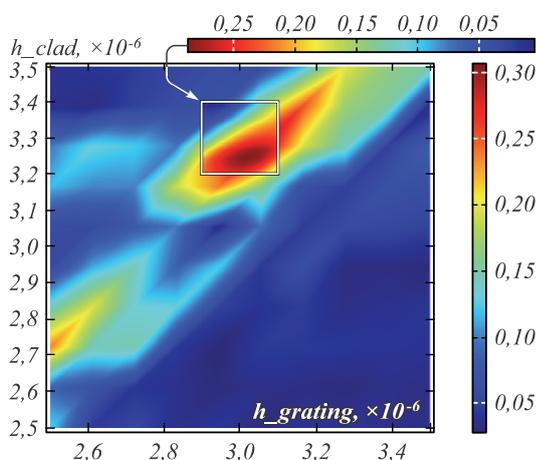


Рис. 5. Влияние верхнего слоя на ядре волновода h_{clad} и высоты решётки на дифракционную эффективность вводимого в волновод излучения. Размерность по осям – метры $\times 10^{-6}$

Мы полагаем, что при большой толщине подложки и покрытия свету проще распространяться в них, чем в ядре. Возможно, при большой толщине кладдинга и глубине решётки в систему кладдинг–ядро попадает и больше света, но в итоге в ядро попадает меньше: пока свет пройдёт 3 микрона до волновода, он, возможно, весь уходит в покрытие, и для ядра уже остается меньше. Математически это тоже понятно, т.к. оптимум для бинарной решётки достигается для полуволнового набегу фазы, а для длины волны 1,55 мкм и показателя преломления 1,5 это и составляет 584 нм рассчитанного для кладдинга 1 мкм.

На рис. 5 по вертикали – толщина верхнего слоя (оболочки), по горизонтали – глубина решётки. Максимальная эффективность для электромагнитного поля составила 0,3. Соответственно, для интенсивности света эффективность составит $0,3^2 = 0,09 = 9\%$. Сравнивая эффективность с рис. 2, видим, что эффективность при увеличении высоты решётки в 2 раза сильно упала (с 30% до 9%). Поэтому можно сделать вывод, что оптимальная бинарная решётка должна соответствовать характеристикам, просчитанным на рис. 2.

Заключение

- 1) Разработана новая, независимая от готовых пластин «кремний на изоляторе» (SOI) технология изготовления плоских волноводных систем. Технология позволяет в одном технологическом цикле изготавливать слои существенно разной толщины, от 70 нм до 3 мкм, что необходимо для изготовления системы «ввод излучения – согласующий элемент – волновод».
- 2) Промоделирована волноводная система, лежащая на кремниевой подложке и состоящая из ядра Si_3N_4 толщиной 70 нм, заключённого между слоями SiO_2 толщиной от 1 до 3 мкм с вводом излучения через дифракционную решётку, создаваемую в верхнем слое толщиной 1 мкм. Показано, что оптимальная высота решётки с периодом 1,6 мкм составляет 0,8 мкм. Угол падения луча, при котором достигается максимальная дифракционная эффективность, имеет две оптимальных зоны падения – 17...23 градуса либо 27...35 градусов. Эффективность ввода составила 30%.
- 3) Промоделирована волноводная система на кремниевой подложке при изменении толщины подстилающего слоя от 1 до 3 мкм. Показано, что в пределах толщин от 1 до 3 мкм имеется 4 максимума эффективности. Максимальная эффективность 9% достигается при толщине подстилающего слоя 1,3 мкм.
- 4) Промоделирована волноводная система при изменении толщины верхнего покровного слоя от 2,5 до 3,5 мкм. Показано, что при изменении толщины слоя сильно меняется эффективность ввода. Максимальная эффективность 9% достигается при толщине покровного слоя 3,25 мкм.
- 5) Для получения максимальной эффективности ввода излучения 30% на кремниевой подложке необходимо изготовить подстилающий слой из SiO_2 толщиной 0,9 мкм, волноводный слой Si_3N_4 толщиной 70 нм, верхний слой, покрывающий волновод, – 1 мкм; протравить дифракционную решётку с периодом 1,6 мкм в верхнем покровном слое высотой 0,8 мкм. Вводить излучение в одном из двух диапазонов углов падения – 17...23 градусов либо (что более предпочтительно) в районе 27...35 градусов.

Таким образом, промоделированы все возможные толщины подстилающего и покровного слоёв для волновода толщиной 70 нм и выбраны их значения для получения максимальной эффективности для бинарной дифракционной решётки с шагом 1,6 мкм для длины волны 1550 нм.

Литература

1. **Van Laere, F.** Compact focusing grating couplers between optical fibers and silicon-on-insulator photonic wire waveguides / F. Van Laere [et al.] // OFC/NFOEC 2007 – 2007 Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference. – 2007. – DOI: 10.1109/OFC.2007.4348869.

2. **Bogaerts, W.** Silicon microring resonators / W. Bogaerts, P. De Heyn, T. Van Vaerenbergh, K. De Vos, S.K. Selvaraja, T. Claes, P. Dumon, P. Bienstman, D. Van Thourhout, R. Baets // *Laser and Photonics Review*. – 2012. – Vol. 6. – P. 47-73.
3. **Hong, J.** A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with a multilayer bottom reflector / J. Hong, A.M. Spring, F. Qiu [et al.] // *Scientific Reports*. – 2019. – Vol. 9. – 12988.
4. **Kotlyar, M.I.** Photonic crystal lens for coupling two waveguides / M.I. Kotlyar, Ya.R. Triandaphilov, A.A. Kovalev, V.A. Soifer, M.V. Kotlyar, Liam O'Faolain // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48, Issue 19. – P. 3722-3730.
5. **Michaels, A.** Inverse design of near unity efficiency perfectly vertical grating couplers / A. Michaels, E. Yablonovitch // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 4. – 4766.
6. **U.S. Patent 9,632,226 B2 G02B 27/0172, G02B 27/0101, G02B 27/4272, G02B 6/0018, G02B 6/293.07, G02B 17/086, G02B 5/1814.** Waveguide grating device / J.D. Waldern [et al], filed of February 12, 2015, published of April 25, 2017.
7. **Jian, J.** High-efficiency hybrid amorphous silicon grating couplers for sub-micron-sized lithium niobate waveguides / J. Jian, P. Xu, H. Chen [et al.] // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 23. – P. 29651-29658.
8. **Su, L.** Fully-automated optimization of grating couplers / L. Su, R. Trivedi [et al.] // *Optics Express*. – 2018. – Vol. 26, Issue 4. – P. 4023-4034.
9. **Ilchenko, V.S.** Microtorus: a high-finesse microcavity with whispering-gallery modes / V.S. Ilchenko, M.L. Gorodetsky, X.S. Yao, L. Maleki // *Optics Letters*. – 2001. – Vol. 26, Issue 5. – P. 256-258.
10. **Savchenkov, A.A.** Mode filtering in optical whispering gallery resonators / A.A. Savchenkov, A.B. Matsko, D. Strekalov, V.S. Ilchenko, L. Maleki // *Electronics Letters*. – 2005. – Vol. 41, Issue 8. – P. 495-497.
11. **Lee, S.** Single radial-mode lasing in a submicron-thickness spherical shell microlaser / S. Lee, M. Oh, J. Lee, K. An // *Applied Physics Letters*. – 2007. – Vol. 90, Issue 20. – 201102.
12. **Zhu, D.** Radially graded index whispering gallery mode resonator for penetration enhancement / D. Zhu, Y. Zhou, X. Yu, P. Shum, F. Luan // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 24. – P. 26285-26291.
13. **Armani, D.K.** Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip / D.K. Armani, T.J. Kippenberg, S.M. Spillane, K.J. Vahala // *Nature*. – 2003. – Vol. 421, Issue 6926. – P. 925-928.
14. **Lin, N.** Design and optimization of liquid core optical ring resonator for refractive index sensing / N. Lin, L. Jiang, S. Wang, H. Xiao, Y. Lu, H.L. Tsai // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50, Issue 20. – P. 3615-3621.
15. **Roelkens, G.** High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay / G. Roelkens, D. Van Thourhout, R. Baets // *Optics Express*. – 2006. – Vol. 14, Issue 24. – P. 11622-11630.
16. **Subramanian, A.Z.** Low-loss single-mode PECVD silicon nitride photonic wire waveguides for 532-900 nm wavelength window fabricated within a CMOS pilot line / A.Z. Subramanian [et al.] // *IEEE Photonics Journal*. – 2013. – Vol. 5, Issue 6. – 2202809.
17. **Huang, Y.** CMOS compatible monolithic multi-layer Si₃N₄-on-SOI platform for low-loss high performance silicon photonics dense integration / Y. Huang [et al.] // *Optics Express*. – 2014. – Vol. 22, Issue 18. – P. 21859-21865.

Сведения об авторах

Соловьёв Владимир Степанович, в 1981 году окончил Куйбышевский авиационный институт (КуАИ, ныне Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Радиотехника». В 1992 году защитил диссертацию кандидата физико-математических наук в ЦКБ Уникального приборостроения. В настоящее время старший научный сотрудник Института нано- и микросистемной техники (НМСТ) в составе Московского национального исследовательского университета электронной техники (МИЭТ). Специалист в области дифракционной оптики, технологии оптических полимерных материалов, лазерной физики, технологии новых материалов для создания фотонных элементов. E-mail: solovjev@polly.phys.msu.ru.

Тимошенков Сергей Петрович, в 1981 году окончил Московский институт электронной техники (МИЭТ), по специальности «Полупроводники и диэлектрики». В 1994 году защитил кандидатскую диссертацию «Синтез многокомпонентных стеклообразных материалов в высокочастотной индукционной плазме». В 2004 году защитил докторскую диссертацию «Технология кремний на изоляторе». В настоящее время является профессором, директором Института нано- и микросистемной техники (НМСТ) в составе Московского национального исследовательского университета электронной техники (МИЭТ). Специализируется в области МОЭМС (Микроопто-электромеханических систем). E-mail: spt111@mail.ru.

Тимошенков Андрей Сергеевич, в 2005 году окончил Московский институт электронной техники (ТУ) по специальности «Биомедицинские системы», в 2008 году окончил МИЭТ по специальности «Менеджмент управление организаций». С 2005 года является сотрудником кафедры БМС МИЭТ. С 2015 года является ведущим специалистом оптической лаборатории института НМСТ МИЭТ. Является специалистом в области эксимерных лазеров. Области научных интересов: МОЭМС, сенсорика, кремниевая фотоника, нанофотоника. E-mail: alfaromeo155@mail.ru.

Виноградов Анатолий Иванович, в 2007 году окончил МИЭТ (федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»). В 2011 году окончил очную аспирантуру МИЭТ по специальности 05.27.06 «Технология и оборудование для производства полупроводников, материалов и приборов электронной

техники». В настоящее время инженер-технолог Института нано- и микросистемной техники (НМСТ) в составе Московского национального исследовательского университета электронной техники (МИЭТ). Специалист в области проектирования и технологии электронных средств, технологии производства полупроводниковых приборов разработки и проектирования фотошаблонов технологии производства МЭМС-устройств.
E-mail: plavec@list.ru.

Кондратьев Никита Михайлович, в 2011 году окончил МГУ имени М.В. Ломоносова. С марта 2011 года аспирант кафедры физики колебаний. Защитил диссертацию кандидата физико-математических наук в 2016 году. С 2014 года работает в Российском Квантовом центре. Специалист в области расчета сложных волноводных и резонансных систем оптического диапазона. E-mail: noxobar@mail.ru.

Расщепкина Наталья Афанасьевна, в 1977 году окончила Куйбышевский государственный университет (КГУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Химия». В 1985 году защитила кандидатскую диссертацию в Уральском политехническом институте им. С.М. Кирова. В настоящее время доцент кафедры аналитической и физической химии Самарского государственного технического университета (СамГТУ). Специалист в области физики и химии твердого тела.
E-mail: rasshhepkina.natalja@rambler.ru.

ГРНТИ: 29.31.29

Поступила в редакцию 17 марта 2020 г. Окончательный вариант – 16 октября 2020 г.

Modeling the input of radiation into plane linear waveguides using diffraction gratings for a new technology for the manufacture of waveguide systems

V.S. Soloviev¹, S.P. Timoshenkov¹, A.S. Timoshenkov¹, A.I. Vinogradov¹, N.M. Kondratiev², N.A. Raschepkina³

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia,

²Russian Quantum Center "RQC", Skolkovo, Moscow, Russia,

³Samara State Technical University Russia

Abstract

The numerical simulation and selection of optimal parameters of the diffraction grating for a newly developed technology for the manufacture of plane waveguide systems are performed. In contrast to the use of ready-made silicon wafers on an insulator, the new technology has been developed for the manufacture of a fully autonomous radiation input system, a coupling element and the waveguide itself. A general description of the technology of the 'radiation input – propagation – radiation output' system is given. Concrete fabrication parameters of the lattice height, the substrate and coating layers are found. The coupling efficiency of radiation input into the waveguide is found to be 30%.

Keywords: linear waveguide, radiation input, waveguide structure, WGM resonator, diffraction grating.

Citation: Soloviev VS, Timoshenkov SP, Timoshenkov AS, Vinogradov AI, Kondratiev NM, Raschepkina NA. Modeling the input of radiation into plane linear waveguides using diffraction gratings for a new technology for the manufacture of waveguide systems. *Computer Optics* 2020; 44(6): 917-922. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-718.

References

- [1] Van Laere F, et al. Compact focusing grating couplers between optical fibers and silicon-on-insulator photonic wire waveguides. *OFC/NFOEC 2007 – Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference 2007*. DOI: 10.1109/OFC.2007.4348869.
- [2] Bogaerts W, De Heyn P, Van Vaerenbergh T, De Vos K, Selvaraja SK, Claes T, Dumon P, Bienstman P, Van Thourhout D, Baets R. Silicon microring resonators. *Laser Photon Rev* 2012; 6: 47-73.
- [3] Hong J, Spring AM, Qiu F, et al. A high efficiency silicon nitride waveguide grating coupler with a multilayer bottom reflector. *Sci Rep* 2019; 9: 12988.
- [4] Kotlyar MI, Triandaphilov YaR, Kovalev AA, Soifer VA, Kotlyar MV, O'Faolain L. Photonic crystal lens for coupling two waveguides. *Appl Opt* 2009; 48(19): 3722-3730.
- [5] Michaels A, Yablonovitch E. Inverse design of near unity efficiency perfectly vertical grating couplers. *Opt Express* 2018; 26(4): 4766.
- [6] Waldern JD, et al. Waveguide grating device. *Pat US 9,632,226 B2* of April 25, 2017.
- [7] Jian J, Xu P, Chen H, et al. High-efficiency hybrid amorphous silicon grating couplers for sub-micron-sized lithium niobate waveguides. *Opt Express* 2018; 26(23): 29651-29658.
- [8] Su L, Trivedi R, et al. Fully-automated optimization of grating couplers. *Opt Express* 2018; 26(4): 4023-4034.
- [9] Ilchenko VS, Gorodetsky ML, Yao XS, Maleki L. Microtorus: a high-finesse microcavity with whispering-gallery modes. *Opt Lett* 2001; 26(5): 256-258.
- [10] Savchenkov AA, Matsko AB, Strekalov D, Ilchenko VS, Maleki L. Mode filtering in optical whispering gallery resonators. *Electron Lett* 2005; 41(8): 495-497.
- [11] Lee S, Oh M, Lee J, An K. Single radial-mode lasing in a submicron-thickness spherical shell microlaser. *Appl Phys Lett* 2007; 90(20): 201102.
- [12] Zhu D, Zhou Y, Yu X, Shum P, Luan F. Radially graded index whispering gallery mode resonator for penetration enhancement. *Opt Express* 2012; 20(24): 26285-26291.
- [13] Armani DK, Kippenberg TJ, Spillane SM, Vahala KJ. Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip. *Nature* 2003; 421(6926), 925-928.
- [14] Lin N, Jiang L, Wang S, Xiao H, Lu Y, Tsai HL. Design and optimization of liquid core optical ring resonator for refractive index sensing. *Appl Opt* 2011; 50(20): 3615-3621.
- [15] Roelkens G, Van Thourhout D, Baets R. High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay. *Opt Express* 2006; 14(24): 11622-11630.
- [16] Subramanian AZ, et al. Low-loss single-mode PECVD silicon nitride photonic wire waveguides for 532-900 nm wavelength window fabricated within a CMOS pilot line. *IEEE Photon J* 2013; 5(6): 2202809.
- [17] Huang Y, et al. CMOS compatible monolithic multi-layer Si3N4-on-SOI platform for low-loss high performance silicon photonics dense integration. *Opt Express* 2014; 22(18): 21859-21865.

Authors' information

Vladimir Stepanovich Soloviev, in 1981 he graduated from Kuibyshev Aviation Institute (KuAI, now Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov) with a degree in Radio Engineering. In 1992 he defended the dissertation of the candidate of Physical and Mathematical Sciences at the Central Design Bureau of Unique Instrument Making. Currently, a senior researcher at the Institute of Nano- and Microsystem Technology (NMST) as part of the Moscow National Research University of Electronic Technology (MIET). Specialist in the field of diffraction optics, technology of optical polymer materials, laser physics, technology of new materials for creating photonic elements. E-mail: soloviev@polly.phys.msu.ru.

Sergey Petrovich Timoshenkov, in 1981 he graduated from the Moscow Institute of Electronic Technology (MIET), specializing in Semiconductors and Dielectrics. In 1994 he defended his thesis on Synthesis of Multicomponent Glassy Materials in High-frequency Induction Plasma. In 2004 he defended his doctoral dissertation “Silicon technology on an insulator”. He is currently a professor, director of the Institute of Nano- and Microsystem Technology (NMST) at the Moscow National Research University of Electronic Technology (MIET). Specializes in the field of MOEMS (Micro-optoelectromechanical systems). E-mail: spt111@mail.ru.

Andrey Sergeevich Timoshenkov, in 2005 he graduated from the Moscow Institute of Electronic Technology (TU) with a degree in Biomedical Systems, in 2008 he graduated from MIET with a degree in Management of Organizations. Since 2005, he is an employee of BMS MIET department. Since 2015, he is a leading specialist in the optical laboratory of the NMST Institute of Electronic Technology and Electronics. He is a specialist in excimer lasers. Fields of scientific interests: MOEMS, sensorics, silicon photonics, nanophotonics. E-mail: alfaromeo155@mail.ru.

Anatoly Ivanovich Vinogradov, in 2007 he graduated from MIET (Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “National Research University” Moscow Institute of Electronic Technology”). In 2011, he graduated from the MIET full-time postgraduate study in the specialty 05.27.06 “Technology and equipment for the production of semiconductors, materials and electronic devices”. Currently, a process engineer at the Institute of Nano- and Microsystem Technology (NMST) as part of the Moscow National Research University of Electronic Technology (MIET). A specialist in the design and technology of electronic devices, the production technology of semiconductor devices, the development and design of photomasks, the production technology of MEMS devices. E-mail: plavec@list.ru.

Nikita Mikhailovich Kondratiev, in 2011 he graduated from Moscow State University named after M.V. Lomonosov. Since March 2011, a graduate student of Physics of Oscillations department. He defended the dissertation of the candidate of Physical and Mathematical Sciences in 2016. Since 2014 he has been working in the Russian Quantum Center. A specialist in the calculation of complex waveguide and resonant systems in the optical range. E-mail: noxobar@mail.ru.

Natalia Afanasevna Raschepkina, in 1977 she graduated from Kuibyshev State University (KSU, now Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov) with a degree in Chemistry. In 1985 she defended her thesis at the Ural Polytechnic Institute named after C.M. Kirov. Currently, associate professor of Analytical and Physical Chemistry department of Samara State Technical University (Samara State Technical University). Specialist in the field of solid state physics and chemistry. E-mail: rasshhepkina.natalja@rambler.ru.

Received March 17, 2020. The final version – October 16, 2020.
