

# Дизайн согласующего элемента ввода излучения в торец в кремниевые фотонные интегральные схемы

А.В. Юрков, А.А. Никитин, А.Б. Устинов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** В статье решается задача о вводе излучения из оптического волокна в торец кремниевых фотонных интегральных схем. Для повышения эффективности ввода используется конусообразный преобразователь. В работе приведены результаты численного моделирования влияния различных геометрических параметров преобразователя на эффективность ввода излучения. В результате исследования предложен дизайн согласующего преобразователя, который обеспечивает потери на ввод излучения не более 0,4 дБ.

**Ключевые слова:** кремний на изоляторе, интегральная фотоника, согласующий элемент, потери на ввод излучения

## 1. Введение

В настоящее время научно-технический прогресс в области кремниевой фотоники обеспечивает разработку высокопроизводительных оптических компонентов для систем телекоммуникации, обработки данных и вычислительных систем. Базовые компоненты кремниевой фотоники реализуются по технологии «кремний на изоляторе» (КНИ) и образованы из кремниевого волновода, окруженного оксидом кремния. Благодаря высокому контрасту показателей преломления этих материалов ( $n_{Si} = 3,47$  и  $n_{SiO_2} = 1,444$ ) излучение на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм локализовано внутри кремниевого волновода, что позволяет добиться высокой плотности размещения элементов на ФИС [1]. Преимуществом технологии кремниевых фотонных интегральных микросхем (ФИС) является их совместимость с КМОП-технологией [1-4], а также богатая нелинейная динамика [4].

На практике электромагнитное излучение вводится в кремниевые ФИС из оптических волокон. Наиболее распространённым волокном, используемым для этих целей, является одномодовое волокно SMF-28. Диаметр сердцевины такого волокна составляет 8,2 мкм, а эффективный показатель преломления  $n_{SMF}$  на длине волны  $\lambda = 1,55$  мкм составляет 1,4677, что обеспечивает эффективную площадь [6] поля моды  $77,3$  мкм<sup>2</sup>. В то же время эффективная площадь поля в кремниевых волноводах с типичными размерами  $500 \times 220$  нм<sup>2</sup> составляет порядка  $0,14$  мкм<sup>2</sup>. Такое несоответствие в эффективных площадях полей приводит к низкой эффективности ввода излучения в ФИС. Это обстоятельство требует разработки согласующих элементов ввода и вывода, обеспечивающих решение задачи согласования и повышения эффективности ввода излучения.

Существует два основных метода ввода излучения в ФИС [1-3]: пространственно-периодические преобразователи, с помощью которых излучение вводится в ФИС под углом; торцевые преобразователи, в которых модовые преобразователи обеспечивают согласование мод без изменения направления распространения. Элементы первой группы реализуются преимущественно в виде дифракционных решеток. К их преимуществам следует отнести практичность, возможность проведения измерения всех элементов на чипе без использования дополнительных технологических операций, таких как резка и подготовка поверхности. К недостаткам таких методов относятся их невысокая эффективность и чувствительность к поляризации

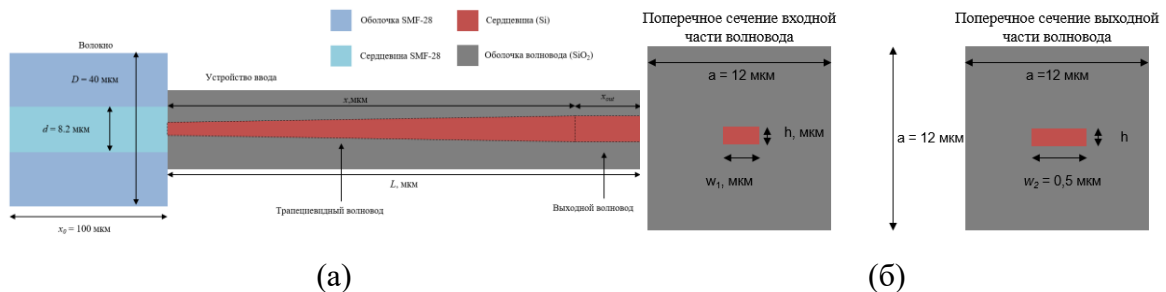
поступающего излучения. В тоже время торцевой ввод обеспечивает более высокую эффективность, слабо чувствителен к поляризации, обеспечивает широкую полосу рабочих частот и является планарным, что упрощает создание неразъёмных соединений, например, при стыковке волокна и ФИС.

Типичные торцевые согласующие элементы ввода представляют собой волноводы с плавно изменяющейся шириной вдоль распространения излучения. Как правило, они имеют трапециевидную форму. Их проектирование требует оптимизации геометрических параметров волноведущей структуры для достижения наибольшей эффективности. В связи с этим, целью данной работы является исследование влияния геометрических параметров торцевого согласующего элемента на эффективность ввода излучения.

## 2. Структура моделируемого устройства и методика исследования

Расчет эффективности ввода излучения проводился численными методами в коммерческой программе, реализующей расчет ФИС методом конечных разностей во временной области. Разработанная модель представлена на рисунке 1 и состоит из волокна SMF-28 и торцевого устройства ввода с кремниевой сердцевиной и оболочкой из оксида кремния.

Оболочка согласующего элемента представляет собой прямоугольный параллелепипед с квадратным поперечным сечением размером  $a = 12$  мкм и длиной  $L$ . Элемент состоит из двух частей: 1) согласующей волновод с плавно изменяющейся шириной; 2) регулярный прямоугольный волновод. Согласующей волновод имеет размеры ширины  $w_1$  и  $w_2$ , а также длину  $x$ . Выходной волновод имеет длину  $x_{out}$  и ширину  $w_2$ . Вся структура имеет толщину  $h$ . Значения эффективных показателей преломления кремния и оксида кремния на длине волны  $\lambda = 1,55$  использованные в расчете равны 3,47 и 1,444, соответственно. Длина волокна  $x_0 = 100$  мкм. Эффективный показатель преломления волокна  $n_{SMF} = 1,55$  мкм.



**Рисунок 1.** Внешний вид модели (без учёта масштаба): (а) вид в плоскости XY, (б) виды в плоскости YZ.

Потери, вносимые согласующим элементом, могут быть разделены на две части. Первая часть  $\alpha_1$  обусловлена рассеянием, возникающим при переходе излучения из волокна в кремниевый волновод из-за рассогласования мод. Вторая часть – рассеянием, возникающим при распространении волны в волноводе переменной ширины.

Потери  $\alpha_1$  характеризуются перекрытием электромагнитных полей волокна и кремниевого волновода и определяются выражением [5]:

$$\alpha_1 = -10 \log_{10}(\eta) \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где  $\eta$  коэффициент перекрытия, зависящий от распределений электрического и магнитного полей волновода  $E_1$  и  $H_1$  и волокна  $E_2$  и  $H_2$  [6]:

$$\eta = Re \left[ \frac{\int E_1 \times H_2^* \cdot dS}{\int E_1 \times H_1^* \cdot dS} \cdot \frac{\int E_2 \times H_1^* \cdot dS}{\int E_2 \times H_2^* \cdot dS} \right]. \quad (2)$$

Потери  $\alpha_1$  и коэффициент перекрытия  $\eta$  зависят от взаимного расположения кремниевого волновода относительно волокна, а также от параметров  $h$  и  $w_1$  [4]. Также важным параметром при исследовании перекрытия является величина эффективной площади поля моды, которая рассчитывается для поперечного сечения рассматриваемой части структуры [7]:

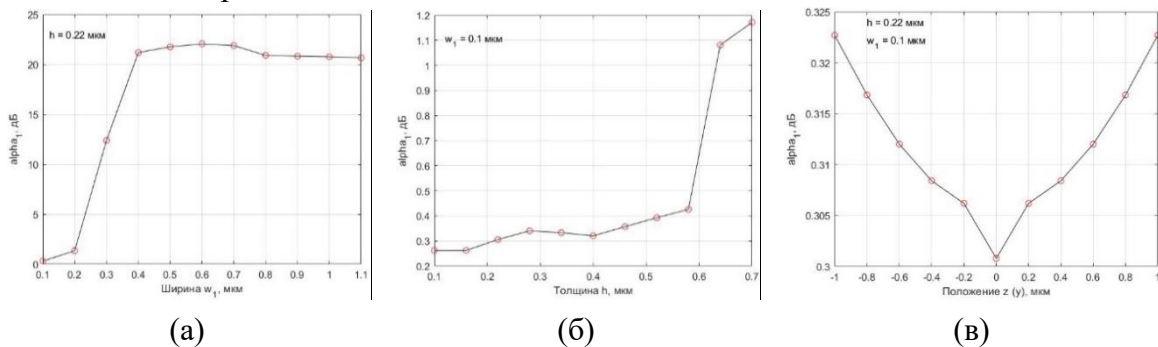
$$S_{eff}^{(i)} = \frac{(\int |E_i|^2 dS)^2}{\int |E_i|^4 dS}. \quad (4)$$

Потери на распространение в волноводе переменной ширины  $\alpha_2$  зависят от значений  $w_1$  и  $w_2$ , а также длины  $x$  и связаны с коэффициентом передачи  $T$  следующим образом:

$$\alpha_2 = -20 \log_{10} |T| \text{ [дБ]}. \quad (5)$$

### 3. Результаты моделирования и их обсуждение

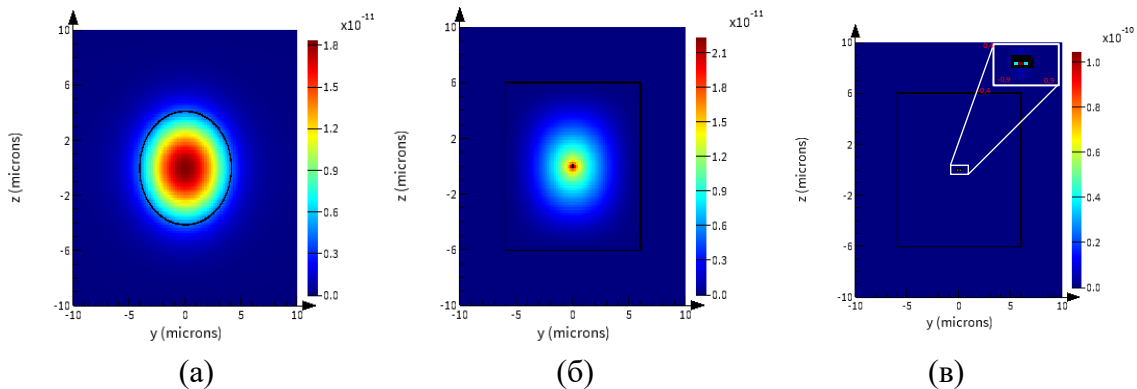
На рисунке 2 представлены рассчитанные зависимости потерь  $\alpha_1$  от каждого из указанных геометрических параметров. Первоначально было определено влияние ширины  $w_1$  на  $\alpha_1$  при типичной толщине кремниевого волновода  $h = 220$  нм. Как видно из рисунка 2(а), уменьшение ширины волновода  $w_1$  от 200 нм до 100 нм обеспечивает снижение потерь с 1,34 дБ до 0,31 дБ. Противоположное изменение ширины волновода приводит к резкому возрастанию потерь до величины порядка 20 дБ при  $w_1$  более 400 нм. Для проведения дальнейших исследований была выбрана ширина волновода, обеспечивающая максимальную эффективность  $w_1 = 100$  нм. Дальнейшие исследования проводились для различных значений толщины при  $w_1 = 100$  нм. Из рисунка 2(б) видно, что  $\alpha_1$  плавно изменяется в диапазоне от 100 до 580 нм и не превышает 0,5 дБ, дальнейшее увеличение толщины приводит к резкому увеличению  $\alpha_1$  до 1 дБ и выше. Из этого рисунка следует, что вклад этого параметра в эффективность ввода излучения мал. При этом изменение этого параметра в технологии КНИ является сложной технологической задачей. Поэтому в предложенной конструкции согласующего устройства использовано типичное значение толщины кремниевых волноводов  $h=220$  нм. Результирующие потери в этом случае, обусловленные рассогласованием мод волокна и волновода сечением  $100 \times 220 \text{ нм}^2$ , составляют 0,31 дБ. Рисунок 2(в) показывает, что при выбранных значениях  $h$  и  $w_1$  наименьшие потери достигаются в случае, если центр волновода совпадает с центром волокна.



**Рисунок 2.** Зависимость потерь  $\alpha_1$ : (а) – от  $w_1$ , (б) – от  $h$ , (в) – от смещения по оси  $z$  (или  $y$ ).

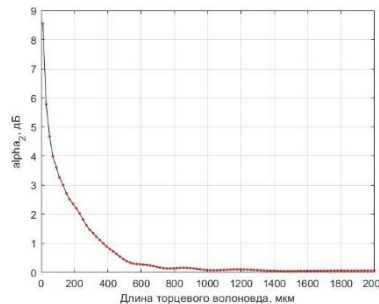
На рисунке 3 изображены распределения плотности мощности волн в волокне SMF-28 (рисунок 3(а)), а также в волноводе сечением  $100 \times 220 \text{ нм}^2$  (рисунок 3(б)), и в

волноводе с размерами типичными для кремниевых ФИС  $500 \times 220 \text{ нм}^2$  (рисунок 3(в)). Потери в первом случае составили 0,3 дБ, а во втором случае 22,2 дБ. Для большей наглядности полученных результатов были рассчитаны эффективные площади мод, которые составили  $77,3 \text{ мкм}^2$ ,  $54,7 \text{ мкм}^2$  и  $0,14 \text{ мкм}^2$  соответственно.



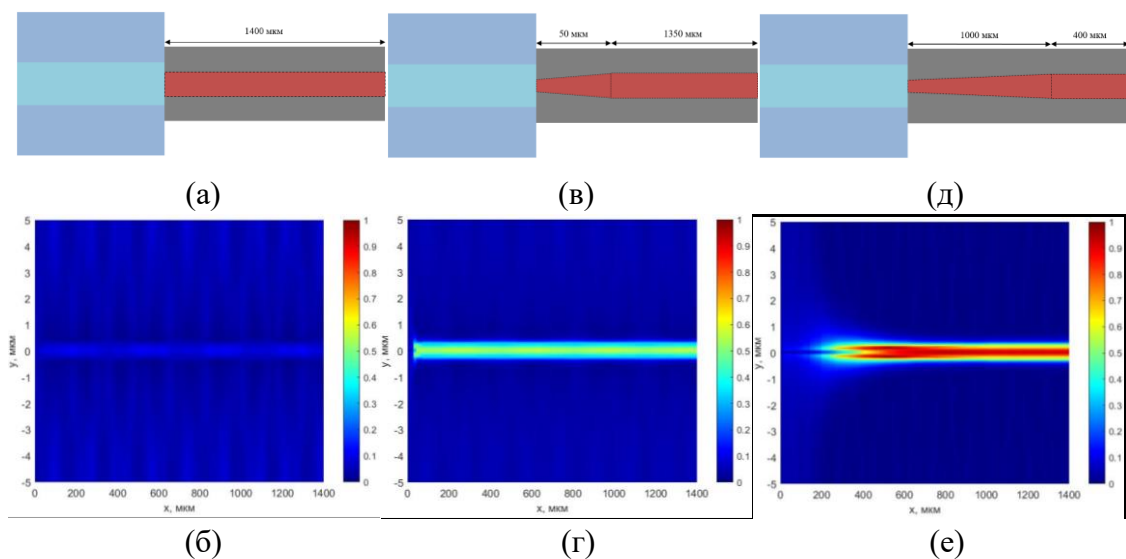
**Рисунок 3.** Распределение плотности мощности в поперечном сечении: (а) – волокна SMF-28; (б) – волновода  $100 \times 220 \text{ нм}^2$ ; (в) – волновода  $500 \times 220 \text{ нм}^2$ .

На рисунке 4 продемонстрирована рассчитанная зависимость потерь на распространения волн ( $\alpha_2$ ) в кремниевом волноводе с линейным изменением ширины от  $w_1 = 100 \text{ нм}$  до  $w_2 = 500 \text{ нм}$  от длины перехода ( $x$ ). При расчёте  $x$  варьировалась в диапазоне от 10 до 2000 мкм. Данная зависимость показывает, что увеличение длины волновода приводит к снижению вносимых потерь, которые при длине  $x > 1000 \text{ мкм}$  не превышает 0,08 дБ.



**Рисунок 4.** Зависимость потерь на распространения волн ( $\alpha_2$ ) от длины волновода с линейным изменением ширины от  $w_1 = 100 \text{ нм}$  до  $w_2 = 500 \text{ нм}$ .

Для подтверждения влияния геометрических параметров согласующего элемента ввода на эффективность передачи света были рассчитаны распределения амплитуды поля ТЕ-моды волны в плоскости XY для трёх случаев, представленных на рисунке 5: 1) ввод излучения из волокна в типичный кремниевый прямоугольный волновод размером  $w_1 = 500 \text{ нм}$ ,  $h = 220 \text{ нм}$  и длиной  $x_{out} = 1400 \text{ мкм}$  без согласующего устройства ( $x = 0$ ); 2) ввод излучения из волокна в согласующий элемент с размерами  $w_1 = 100 \text{ нм}$ ,  $h = 220 \text{ нм}$  и длиной  $x = 50 \text{ мкм}$ , подключенный к волноводу с  $w_2 = 500 \text{ нм}$ ,  $h = 220 \text{ нм}$  и длиной  $x_{out} = 1350 \text{ мкм}$ ; 3) ввод излучения из волокна в согласующий элемент с размерами  $w_1 = 100 \text{ нм}$ ,  $h = 220 \text{ нм}$  и длиной  $x = 1000 \text{ мкм}$ , подключенный к волноводу с  $w_2 = 500 \text{ нм}$ ,  $h = 220 \text{ нм}$  и длиной  $x_{out} = 400 \text{ мкм}$ . Полученные результаты подтверждают, что потери на ввод в первом случае максимальны и составляют 19,4 дБ. Использование согласующего перехода с плавным изменением ширины от  $w_1 = 100 \text{ мкм}$  до  $w_2 = 500 \text{ мкм}$  длиной 50 мкм позволяет снизить потери до 5 дБ. Увеличение длины плавного перехода позволяет уменьшить потери на ввод излучения до 0,4 дБ.



**Рисунок 5.** Схема ввода излучения и нормированное распределение амплитуды поля ТЕ-моды волны в плоскости XY для волокна, подключенного к волноводу без согласующего перехода (а, б), через согласующий переход длиной  $x = 50$  мкм (в, г), через согласующий переход длиной  $x = 1000$  мкм (е, д).

## Заключение

В работе с помощью методов численного моделирования проведено исследование влияния геометрических параметров торцевого согласующего элемента на эффективность ввода излучения из оптического волокна SMF-28 в ФИС, изготовленную по технологии КНИ. В результате исследования продемонстрировано влияние геометрических размеров поперечного сечения кремниевого волновода, а также длины согласующего элемента с линейным изменением ширины на эффективность ввода излучения из волокна SMF-28. На основании полученных результатов была предложена конструкция согласующего элемента с линейным изменением ширины от  $w_1 = 100$  нм до  $w_2 = 500$  нм длиной  $x = 1000$  мкм, обеспечивающая потери на ввод излучения менее 0,4 дБ.

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (грант номер **FSEE-2025-0014**).

## Список литературы

1. Косолюбов С. С. и др. Кремниевая интегральная фотоника // Успехи физических наук. – 2024. – Т. 194. – №. 11. – С. 1223-1239.
2. Никитин А. А. и др. Метод определения частотных зависимостей коэффициентов затухания и связи оптического микрокольцевого резонатора с прямым волноводом // Журнал технической физики. – 2024. – Т. 94. – №. 8. – С. 1382-1390.
3. Chrostowski L., Hochberg M. Silicon photonics design: from devices to systems. – Cambridge University Press, 2015.
4. Marchetti R. et al. Coupling strategies for silicon photonics integrated chips // Photonics Research. – 2019. – V. 7. – №. 2. – p. 201-239.
5. Wang M. K. et al. A cost-effective edge coupler with high polarization selectivity for thin film lithium niobate modulators // Journal of Lightwave Technology. – 2021. – V. 40. – №. 4. – p. 1105-1111.
6. Agrawal G. P. Nonlinear fiber optics // Nonlinear Science at the Dawn of the 21st Century. – Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2000. – p. 195-211.
7. Okamoto K. Fundamentals of optical waveguides. – Elsevier, 2021.