

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОФОТОННОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО МОДУЛЯТОРА НА СТРУКТУРЕ «КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ»

Масальский Н.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук

### Аннотация

Обсуждается перспективный подход масштабирования характеристик кремниевых нанофотонных модуляторов, выполненных на основе технологии «кремний на изоляторе». Оптические характеристики волноводной структуры изменяются при помощи дисперсии свободных носителей. На основе численных расчётов оптимизируются топологические параметры устройства для достижения высоких модуляционных характеристик.

**Ключевые слова:** кремниевая фотоника, волноводная оптическая структура, электрооптический модулятор, кремний на изоляторе.

### Введение

В настоящее время кремниевая фотоника бурно развивается главным образом благодаря недавним технологическим и экспериментальным достижениям в области методов оптической обработки информации [1]. Повышение степени интеграции ИОС (интегральных оптических схем) – основное направление развития современной кремниевой фотоники [2, 3]. Предпосылки решения этой задачи – разработка нанофотонных устройств нового поколения.

Активные волноводные устройства (модуляторы и переключатели), обеспечивающие прекрасные характеристики управления оптическими лучами для обработки информации, находят широкое применение в ИОС. Как известно, для кремниевых устройств основные методы модуляции базируются либо на термооптическом, либо на электрооптическом эффекте. Изменение реального оптического показателя преломления кремния вследствие термооптического эффекта довольно значительно [4]. Однако термооптический эффект довольно медленный и может использоваться для частот модуляции в пределах до 1 МГц. Для более высоких частот модуляции, до нескольких сотен мегагерц, требуются электрооптические устройства. В ненапряжённом чистом кристаллическом кремнии отсутствует линейный электрооптический эффект (эффект Покельса), а из-за нелинейных эффектов – эффекта Франца–Келдыша и эффекта Керра – показатель преломления изменяется очень незначительно. Поэтому методы модуляции базируются на эффекте дисперсии свободных носителей [5], в результате которого изменяется как реальный показатель преломления, так и коэффициент поглощения излучения оптического диапазона.

Концентрация свободных носителей в электрооптических устройствах может быть получена различными способами [2, 6]. С этой целью могут использоваться *p-i-n*-диоды или структуры «металл-окисел-полупроводник» (МОП-структуры). Применение МОП-устройств характеризуется высокоскоростным функционированием и низким уровнем потребления питания. Однако и для обеднения, и для накопления значительные изменения концентрации возможны только в маленьких областях (несколько десятков нанометров) ниже области изолированного затвора. Это

влечёт незначительное перекрытие между оптической модой и распределением неравновесного заряда в волноводе, приводя к несущественному изменению эффективного показателя преломления. Напротив, в *p-i-n*-конфигурации носители могут быть инжектированы в большей области (внутренняя область волновода), чтобы максимизировать вышеупомянутое перекрытие, увеличив таким образом эффективное изменение показателя преломления. В этом случае при разработке устройства необходимо учесть, что высоколегированные *p*- и *n*-области не должны ни значительно влиять на оптическое ограничение, ни обеспечивать чрезмерные потери. Кроме того, электроэнергия, необходимая для изменения показателя преломления, должна быть низкой, чтобы её уровень минимизировал термооптический эффект.

Отличительной особенностью технологии КНИ (кремний на изоляторе) является то, что она обладает высоким потенциалом для производства коммерчески доступных ИОС и оптоэлектронных устройств [2]. Одно из неоспоримых преимуществ данной технологии – её полная совместимость с широко используемой полупроводниковой технологией комплементарных структур «металл-окисел-полупроводник» [6, 7]. Подложка КНИ имеет приоритетное значение для интегральных оптоэлектронных схем с широкомасштабной возможностью интеграции оптических и электронных функций на однокристалльном чипе.

Совместное применение этих двух технологий открывает возможность реализации высокоэффективной оптической модуляции. Несмотря на то, что к настоящему моменту в мире разработано и запатентовано несколько типов волноводных *p-i-n* КНИ-модуляторов [2, 4, 6, 8, 9], однако ни один из них не обладает достаточным потенциалом для того, чтобы быть применимым во всех возможных приложениях, в основном за счёт больших массогабаритных характеристик и высокой потребляемой мощности. Перспективным решением этой проблемы является масштабирование размеров модулятора. Масштабирование – очень полезная операция. Она позволяет повысить эффективность модуляции за счёт большей локализации оптической мощности, снизить потребляемую энергию за счёт уменьшения размеров устройства и поднять частоту модуляции.

На основе компьютерного моделирования в данной работе исследуются пути масштабирования параметров нанофотонных *p-i-n* волноводных модуляторов, которые потенциально позволят реализовать высокоэффективную оптическую модуляцию.

**1. Структура модулятора**

На рис. 1 показано схематическое поперечное сечение анализируемой конфигурации *p-i-n* КНИ-волноводного модулятора. Его волноводная часть – это гребенчатый волновод (1), расположенный (размещённый) на толстом слое погружённого окисла кремния SiO<sub>2</sub> (2). Высота гребенчатого волновода *H*, высота его ребра *h<sub>r</sub>* и высота основания *h<sub>s</sub>* подчиняются условиям:  $H = h_r + h_s$  и  $h_r \gg h_s$ . В основании гребенчатого волновода относительно каждой боковой грани ребра сформированы *p+* и *n+* высоколегированные области (4) с концентрацией примеси  $1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и выше. Ширина легированных областей и их расстояния до боковых граней ребра обозначены как *w<sub>d</sub>* и *w<sub>s</sub>* соответственно. Ширина волноводной структуры  $W_w = w_r + 2w_s$ , где *w<sub>r</sub>* – ширина ребра, общая ширина модулятора  $W = w_r + 2(w_d + w_s)$ . Центральная часть волноводной структуры (гребень и часть основания) легирована примесью *n*-типа с базовой концентрацией. Полное внутреннее отражение обеспечивается погружённым окислом и плакирующим слоем SiO<sub>2</sub>, который покрывает всю структуру.

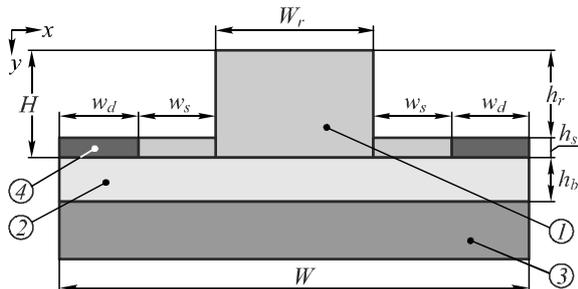


Рис. 1. Поперечное сечение *p-i-n* КНИ-волноводного оптического модулятора:

- 1 – кремниевый гребенчатый волновод,
- 2 – SiO<sub>2</sub> погружённый окисел, 3 – подложка,
- 4 – высоколегированные области

**2. Обобщённая модель модулятора**

Для моделирования характеристик фотонного модулятора необходимо совместное решение уравнений Пуассона и непрерывности для электронов и дырок, которые управляют транспортом заряда в полупроводниковой части устройства, а с другой стороны, уравнения Максвелла для гребенчатого волновода, которое описывает распространение оптического пучка через него.

**2.1. Электрическая модель**

Коммерчески доступный двумерный пакет программ моделирования ATLAS фирмы SILVACO [10] использовался, чтобы рассчитать распределение носителей в волноводной области. Применимость этого программного обеспечения для моделирования устройства, чтобы проанализировать электрооптические

модуляторы на КНИ-волноводах, демонстрировалась другими авторами (см., например, [6], [11]). Эта программа моделирует на физическом уровне характеристики полупроводниковых устройств, решая численно уравнения Пуассона и уравнения неразрывности для электронов и дырок. Программное обеспечение позволяет осуществить полный статистический подход (статистика Ферми–Дирака), когда, например, рассматривают высоколегированные области. Модели рекомбинации носителей включают рекомбинацию Шокли–Рида–Холла (*Shockley–Read–Hall*) (ШРХ), Оже-рекомбинацию и поверхностную рекомбинацию. Пакет программ моделирования также включает тепловое моделирование, в которое входит омический нагрев, нагревание и охлаждение из-за генерации носителей и рекомбинации, температура окружающей среды и определённый теплоотвод структуры.

**2.2. Оптическая модель**

Для вычисления распределения оптических полей в волноводной структуре и оптических потерь из-за поглощения носителей использован метод распространения луча (*beam propagation method*, ВМР), реализованный в коммерческой программе BeamPROP [12]. Исходя из значений концентраций электронов и дырок в любой точке *p-i-n*-структуры (вычисленных с помощью электрической модели), рассчитывается изменение реального показателя преломления ( $\Delta n$ ) и изменение поглощения излучения оптического диапазона ( $\Delta \alpha$ ), которые определяются дисперсией свободных носителей, которые инжектированы из высоколегированных областей [5].

**3. Результаты моделирования**

**3.1. Исходные технологические параметры**

Для моделирования характеристик приняты значения физических и топологических параметров, свойственных для кремниевых электрооптических модуляторов [13], которые приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры *p-i-n* КНИ-волноводного оптического модулятора

Параметры	Значения
Длина волны света в вакууме, нм	1552
Температура, К	298
Показатель преломления кремния	3,47
Показатель преломления окиси кремния	1,44
Базовый уровень легирования кремния, см <sup>3</sup>	$1 \times 10^{15}$
Высота волновода, нм	210
Ширина гребня, нм	300
Толщина погружённого слоя, нм	940
Теплопроводность кремния, Вт(см К) <sup>-1</sup>	1,55
Теплоёмкость кремния, Дж.см <sup>3</sup>	1,67

В наших вычислениях использовалась модель концентрации носителей с учётом рекомбинации ШРХ с предполагаемым временем жизни носителей в

центральной части электронов и дырок  $t_n = 700$  нс и  $t_p = 300$  нс соответственно при базовой концентрации легирования.

При моделировании предполагалось, что омические контакты идеальны. Они не вносят дополнительного контактного сопротивления или ёмкости. Кроме того, электрические контакты (электроды), как полагали, функционируют также как тепловые контакты (тепловыводы) при фиксированной температуре 298 К.

### 3.2. Приборные характеристики

Волноводная структура, приведённая на рис. 1, поддерживает только одну моду (является одномодовой) как для ТЕ-, так и для ТМ-мод для разных толщин основания  $h_s$ . Интеграл перекрытия оптических полей полоскового волновода и волноводного ребра отражает изменение распределения поля в полосковом волноводе и влияет на общее распределение поля во всей волноводной структуре. Зависимость интеграла перекрытия от толщин основания  $h_s$  приведена на рис. 2.

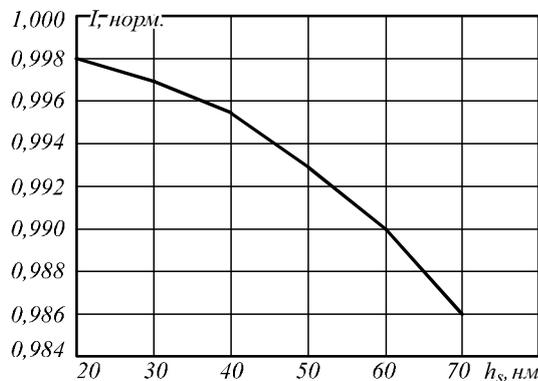


Рис. 2. Зависимость интеграла перекрытия оптических полей ребра и основания от толщины основания

Следует отметить, что значение интеграла перекрытия практически не зависит от параметра  $h_s$ , что позволяет утверждать, что использование тонкого основания не влияет на распределение моды в ребре волноводной структуры по сравнению с полосковым волноводом. Это важно, поскольку открывается возможность реализовать высокоэффективную связь между гребенчатым волноводом и оптическим волокном.

Потребляемая мощность – один из определяющих параметров данного типа устройств. С одной стороны, необходимо обеспечить высокие инжекционные условия [11], с другой стороны, нужно минимизировать влияние термооптического эффекта. Результаты моделирования показывают, что требуемые инжекционные условия обеспечиваются при напряжении прямого смещения в диапазоне между 0,8 и 1,1 В. В этом случае концентрации инжектированных электронов и дырок практически равны во внутренней области волновода и их распределения одинаковы. При напряжении прямого смещения 0,82 В концентрация носителей составляет приблизительно  $3,3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и вызывает реальное изменение показателя преломления  $\Delta n = -1,1 \times 10^{-3}$ .

Скорость поверхностной рекомбинации носителей на поверхности раздела между кремниевым волноводом

и окружением  $\text{SiO}_2$  является одним из основных факторов, ограничивающих модуляционные характеристики устройств. Для этих условий на рис. 3 представлена характерная зависимость удельной потребляемой статической мощности от скорости рекомбинации.

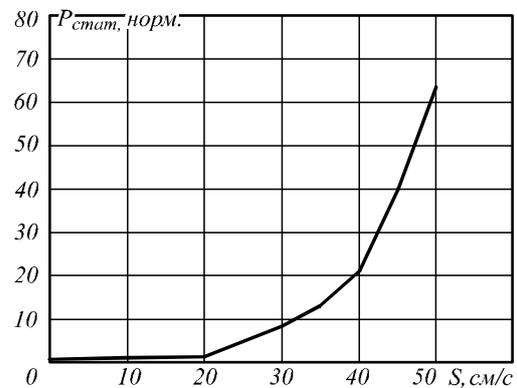


Рис. 3. Нормированная зависимость удельной потребляемой статической мощности от скорости поверхностной рекомбинации (в логарифмическом масштабе)

Так, для  $S_n = S_p = 10^5 \text{ см/с}$  (где  $S_n, S_p$  – скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок соответственно), т. е. для случая, когда поверхностное пассивирование отсутствует, потребляемая мощность резко возрастает по сравнению с идеальным случаем. Это также приводит к существенному снижению концентрации инжектированных носителей.

Для скорости рекомбинации  $10^2 \text{ см/с}$ , которая соответствует случаю поверхности волновода, пассивированная термически выращенным  $\text{SiO}_2$  [14], при напряжении прямого смещения 0,82 В удельная потребляемая мощность возрастает всего в 1,3 раза относительно идеального случая. Это, в свою очередь, приводит к незначительному увеличению температуры устройства, меньше чем  $10^{-2} \text{ К}$ .

Одним из основных механизмов возникновения оптических потерь является перекрытие высоколегированных поглощающих областей с волноводной оптической модой. Поэтому необходимо оптимизировать расстояние  $w_s$  от высоколегированных областей до боковых граней ребра волновода. С одной стороны, величина параметра  $w_s$  должна быть достаточно большой, чтобы уменьшить перекрытие этих очень поглощающих областей с волноводной оптической модой. С другой стороны, она должна быть достаточно короткой, чтобы минимизировать потребляемую мощность и время переключения. Точно так же толщина основания  $h_s$  должна быть достаточно тонкой, чтобы обеспечить высокое боковое оптическое ограничение и уменьшить перекрытие высоколегированных областей с оптическим полем, но достаточно толстой, чтобы упростить его практическую реализацию. На рис. 4 представлены результаты моделирования зависимости оптических потерь из-за поглощения носителей как функция  $w_s$  для различных значений  $h_s$ . При этом для выбранных выше условий в ре-

жиме ON (инжектирование носителей) изменение коэффициента поглощения  $\Delta\alpha = 4,35 \text{ см}^{-1}$ .

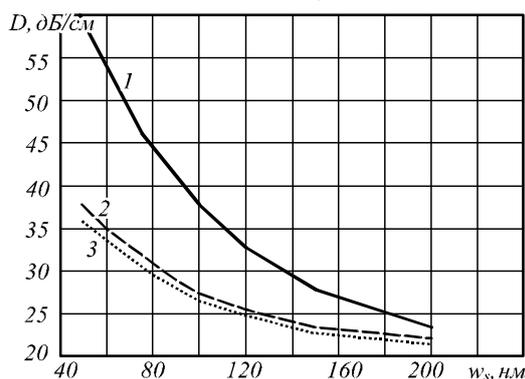


Рис. 4. Зависимость оптических потерь от расстояния между гранью гребня и краем высоколегированной области при разных  $h_s$ , где 1 –  $h_s = 50$  нм, 2 –  $h_s = 30$  нм, 3 –  $h_s = 20$  нм

Следует отметить, что потери высоки для  $w_s < 50$  нм (37–59 дБ/см) во всём диапазоне рассматриваемых значений  $h_s$ . Это вызвано тем, что близость высоколегированных (сильно поглощающих) областей к ребру увеличивает перекрытие с оптической модой. С другой стороны, потери значительно ниже, когда легированные области отодвинуты (расстояние) от боковой грани ребра. Например, при  $w_s = 200$  нм потери оцениваются 22–23 дБ/см в режиме ON. Результаты на рис. 4 также иллюстрируют, что потери увеличиваются с увеличением  $h_s$  для данного  $w_s$ . Это происходит вследствие того, что чем более толстое основание, тем большая часть оптического поля накладывается на высоколегированные области, увеличивая потери. Во всех случаях наблюдается замечательный инкремент оптических потерь при инжекции носителей. Это увеличение возрастает с ростом параметра  $h_s$  в результате большей площади поглощения инжектированных носителей. В режиме OFF (носители не инжектированы) уровень потерь ниже примерно на 20 дБ/см.

Полученные результаты показывают, что с оптической точки зрения толщина основания должна быть меньше или равна 30 нм. При практической реализации толщиной основания можно точно управлять при помощи термического оксидирования после процесса травления ребра. Термическое оксидирование также желательно для сокращения поверхностной шероховатости [14].

Как отмечено в [15], влияние контактного сопротивления электродов на суммарную мощность незначительно, если металлизация контактов выполнена надлежащим образом. Например, если контакты Co/Si выполнены на обоих электродах, то соответствующие значения контактного сопротивления составляют  $1,6 \times 10^{-7} \text{ Ом} \times \text{см}^2$  и  $8,9 \times 10^{-7} \text{ Ом} \times \text{см}^2$  на высоколегированных n и p областях соответственно.

Время переключения модулятора из состояния в состояние определяется процессами либо диффузии, либо удаления носителей из внутренней области волноводной структуры. Для изменения показателя преломления полагаем, что время включения ( $t_{\text{ON}}$ ) – это

время, требуемое для его изменения от 10 % до 90 % его максимального абсолютного значения  $\Delta n$ . Аналогично время выключения ( $t_{\text{OFF}}$ ) определено как время, необходимое для его изменения от 90 % до 10 % его максимального абсолютного значения. Для модельного случая структуры с  $h_s = 20$  нм и  $w_s = 100$  нм для переключающего импульса напряжения в состоянии ON с параметрами  $U_{\text{OFF}} = -1$  В и  $U_{\text{ON}} = 0,82$  В значения  $t_{\text{ON}}$  и  $t_{\text{OFF}}$  составляют 0,84 и 0,14 нс. Суммарное время составляет менее 1 нс.

Повышение температуры устройства происходит во время перехода от ON-состояния к OFF-состоянию, благодаря значительному увеличению переходного обратного тока. Максимальное увеличение температуры составляет 0,12 К. Оно совершается броском (резким подъёмом и плавным спадом практически до первоначального уровня) за время чуть больше 1 нс. Это указывает на эффективный отвод тепла через тепловые контакты и незначительный термооптический эффект.

Другой результат моделирования получен при исследовании возможности реализовать волноводные структуры с маленьким радиусом искривления (в несколько микрон) без существенного повышения уровня потерь. Это важно для повышения интеграции ИОС. Например, если волноводная структура изгибается влево, то оптическое поле смещается к правой стороне (+x-ось на рис. 1) из-за изгибающегося эффекта, перекрывая значительно легированную область, находящуюся по ту сторону изгиба (n+ область). Потери из-за изгиба становятся существенными, когда толщина основания  $h_s$  увеличивается. Это вызвано тем, что чем выше основание, тем глубже боковое проникновение оптического поля в выпуклую (внешнюю) сторону изгиба. Тем самым увеличивается перекрытие с высокопоглощающими областями. Следует отметить, что характер зависимости потерь от  $w_s$  для данного значения параметра  $h_s$  аналогичен случаю, рассмотренному выше. Однако при моделировании показано замечательное свойство искривлённых структур – при значениях  $h_s$  30 нм и ниже уровень потерь практически не изменяется относительно случая линейной волноводной структуры.

### Заключение

Предложен метод масштабирования характеристик нанофотонного p-i-n-модулятора на структуре «кремний на изоляторе». На основе численных решений исследованы его характеристики и рассмотрены пути их оптимизации. Результаты моделирования показывают, что масштабирование топологических размеров гребенчатого волновода позволяет существенно снизить потребляемую мощность и обеспечить общее время переключения менее 1 нс при приемлемых оптических потерях и незначительном термооптическом эффекте. Для выбранной конфигурации волновода с общими размерами по высоте 210 нм и ширине 500 нм, высоте основания 20 нм и расстоянию от высоколегированных облас-

тей до ребра 100 нм для импульсного переключения управляющего напряжения  $-1$  В и  $0,82$  В время переключения составляет менее  $1$  нс и потребляемая мощность  $1,45$  Вт/м. Эти характеристики делают проанализированную конфигурацию очень перспективной для реализации основанных на наноразмерных волноводных структурах КНИ-активных элементов и должны представлять важный шаг в разработке ИОС с повышенной степенью интеграции и низким потреблением питания.

**Литература**

1. **Сойфер, В.А.** Нанопотоника и дифракционная оптика / В.А. Сойфер // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2 – С. 110-119. – ISSN 0134-2452.
2. **Soref, R.** The past, present, and future of silicon photonics / R. Soref // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. – 2006. – Vol. 12(11). – P. 1678-1687.
3. **Ahn, J.** Devices and architectures for photonic chip-scale integration / J. Ahn, M. Fiorentino, R.G. Beausoleil, N. Binkert, A. Davis, D. Fattal, N.P. Jouppi, M. McLaren, C.M. Santori, R.S. Schreiber, S.M. Spillane, D. Vantrease, Q. Xu // Applied Physics A. – 2009. – Vol. 95(5). – P. 989-997.
4. **Cocorullo, C.** Silicon thermo-optical micro-modulator with 700 kHz and 3 dB bandwidth / C. Cocorullo, M. Iodice, I. Rendina, P.M. Sarro // IEEE Photonic Technology Letters. – 1995. – Vol. 7(1). – P. 363-365.
5. **Soref, R.** Electro optical effects in silicon / R. Soref, B. Bennett // IEEE Quantum Electronics – 1987. – Vol. 23(1). – P. 123-129.
6. **Salib, M.** Silicon Photonics / M. Salib, L. Liao, R. Jones, M. Morse, A. Liu, D. Samara-Rubio, D. Alduino, M. Paniccia // Intel Technology Journal. – 2004. – Vol. 8(1). – P. 143-160.
7. **Bogaerts, W.** Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology / W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. Campenhout, P. Bienstman, D. Thourhout // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2005. – Vol. 23(2). – P. 401-412.
8. **Liu, A.** High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide / A. Liu, L. Liao, D. Rubin, H. Nguyen, B. Ciftcioglu, Y. Chetrit, N. Izhaky, M. Paniccia // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(3). – P. 660-668.
9. **Feng, N.** 30GHz Ge electro-absorption modulator integrated with 3µm silicon-on-insulator waveguide / N. Feng, D. Feng, S. Liao, X. Wang, P. Dong, H. Liang, C. Kung, W. Qian, J. Fong, R. Shafiqi, Y. Luo, J. Cunningham, A. Krishnamoorthy, M. Asghari // Optics Express. – 2011. – Vol. 19(22). – P. 7062-7067.
10. Silvaco International, 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.silvaco.com/> (дата обращения 1.12.2012).
11. **Hewitt, P.D.** Improved modulation performance of a silicon p-i-n device by trench isolation / P.D. Hewitt, G.T. Reed // IEEE Lightwave Technology. – 2001. – Vol. 19(2). – P. 387-395.
12. Rsoft Photonic CAD Suite by RSoft Design Group, Inc. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rsoftdesign.com> (дата обращения 27.01.2014).
13. **Масальский, Н.В.** Характеристики субмикронного фотонного фазового модулятора на структуре «кремний на изоляторе» / Н.В. Масальский // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 10. – С. 38-42. – ISSN 1813-8586.

14. **Cutolo, A.** Silicon electro-optic modulator based on a three terminal device integrated in a low-loss single-mode SOI waveguide / A. Cutolo, M. Iodice, P. Spirito, L. Zeni // IEEE Lightwave Technology. – 1997. – Vol. 15(2). – P. 505-511.
15. **Nakatsuka, O.** Contact resistivities and electrical characteristics of Co/Si contact by rapid thermal annealing annealing / O. Nakatsuka, T. Ashizawa, H. Iwano, S. Zaima, Y. Yasuda // Proc. Adv. Metallization Conf. (AMC 1998). – 1999. – Vol. 784. – P. 605-610.

**References**

1. **Soifer, V.A.** Nanophotonic and diffraction optics / V.A. Soifer // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32(2). – P. 110-119. – ISSN 0134-2452. – (In Russian).
2. **Soref, R.** The past, present, and future of silicon photonics / R. Soref // IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics. – 2006. – Vol. 12(11). – P. 1678-1687.
3. **Ahn, J.** Devices and architectures for photonic chip-scale integration / J. Ahn, M. Fiorentino, R.G. Beausoleil, N. Binkert, A. Davis, D. Fattal, N.P. Jouppi, M. McLaren, C.M. Santori, R.S. Schreiber, S.M. Spillane, D. Vantrease, Q. Xu // Applied Physics A. – 2009. – Vol. 95(5). – P. 989-997.
4. **Cocorullo, C.** Silicon thermo-optical micro-modulator with 700 kHz and 3 dB bandwidth / C. Cocorullo, M. Iodice, I. Rendina, P.M. Sarro // IEEE Photonic Technology Letters. – 1995. – Vol. 7(1). – P. 363-365.
5. **Soref, R.** Electro optical effects in silicon / R. Soref, B. Bennett // IEEE Quantum Electronics – 1987. – Vol. 23(1). – P. 123-129.
6. **Salib, M.** Silicon Photonics / M. Salib, L. Liao, R. Jones, M. Morse, A. Liu, D. Samara-Rubio, D. Alduino, M. Paniccia // Intel Technology Journal. – 2004. – Vol. 8(1). – P. 143-160.
7. **Bogaerts, W.** Nanophotonic waveguides in silicon-on-insulator fabricated with CMOS technology / W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. Campenhout, P. Bienstman, D. Thourhout // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 2005. – Vol. 23(2). – P. 401-412.
8. **Liu, A.** High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide / A. Liu, L. Liao, D. Rubin, H. Nguyen, B. Ciftcioglu, Y. Chetrit, N. Izhaky, M. Paniccia // Optics Express. – 2007. – Vol. 15(3). – P. 660-668.
9. **Feng, N.** 30GHz Ge electro-absorption modulator integrated with 3µm silicon-on-insulator waveguide / N. Feng, D. Feng, S. Liao, X. Wang, P. Dong, H. Liang, C. Kung, W. Qian, J. Fong, R. Shafiqi, Y. Luo, J. Cunningham, A. Krishnamoorthy, M. Asghari // Optics Express. – 2011. – Vol. 19(22). – P. 7062-7067.
10. Silvaco International, 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054 [Electronical Resource]. – URL: <http://www.silvaco.com/> (request date 1.12.2012).
11. **Hewitt, P.D.** Improved modulation performance of a silicon p-i-n device by trench isolation / P.D. Hewitt, G.T. Reed // IEEE Lightwave Technology. – 2001. – Vol. 19(2). – P. 387-395.
12. Rsoft Photonic CAD Suite by RSoft Design Group, Inc. [Electronical Resource]. – URL: <http://www.rsoftdesign.com> (request date 27.01.2014).
13. **Masalsky, N.V.** Characteristics of the submicronic photon phase modulator on structure "silicon on an insulator" / N.V. Masalsky // Nano- and Microsystem Technique. – 2013. – Vol. 10. – P. 38-42. – ISSN 1813-8586. – (In Russian).

14. **Cutolo, A.** Silicon electro-optic modulator based on a three terminal device integrated in a low-loss single-mode SOI waveguide / A. Cutolo, M. Iodice, P. Spirito, L. Zeni // IEEE Lightwave Technology. – 1997. – Vol. 15(2). – P. 505-511.
15. **Nakatsuka, O.** Contact resistivities and electrical characteristics of Co/Si contact by rapid thermal annealing annealing / O. Nakatsuka, T. Ashizawa, H. Iwano, S. Zaima, Y. Yasuda // Proc. Adv. Metallization Conf. (AMC 1998). – 1999. – Vol. 784. – P. 605-610.

---

## SIMULATION OF CHARACTERISTICS OF A NANOPHOTONIC ELECTROOPTICAL MODULATOR ON A SILICON ON INSULATOR STRUCTURE

*N.V. Masalsky*

*Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences*

### **Abstract**

A promising approach to simulating characteristics of silicon nanophotonic modulators fabricated using a standard Silicon On Insulator (SOI) fabrication process is discussed. Optical characteristics of the waveguide structure are changed by means of the free-carrier dispersion effect. On the basis of numerical calculations, the device topological parameters are optimized for achievement of superior modulation characteristics.

**Keywords:** silicon photonic, waveguide optical structure, electrooptical modulator, Silicon On Insulator (SOI).

---

### **Сведения об авторе**

**Масальский Николай Валерьевич**, 1960 г.р., к.ф.-м.н., с.н.с. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН). Область научных исследований: кремниевая нанофотоника, физика структур «кремний на изоляторе», методы высокоскоростной обработки информации.

E-mail: [volkov@niisi.ras.ru](mailto:volkov@niisi.ras.ru).

**Nikolay Valeryevich Masalsky**, 1960, Ph.D., Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences. Area of scientific researches: silicon nanophotonics, physics of structures silicon on an insulator, high speed data processing methods.

---

*Поступила в редакцию 27 января 2015 г.  
Окончательный вариант – 30 марта 2015 г.*