
Физика

УДК 621.372.8

Модуляционные характеристики наноразмерных $p-i-n$ КНИ устройств

Н. В. Масальский

*Отдел прикладной математики и информатики
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Научно-исследовательский институт системных исследований
Нахимовский просп., д. 36-1, Москва, Россия, 117218*

Оптические волноводные устройства — модуляторы и переключатели являются одними из самых востребованных фотонных устройств, от которых зависит дальнейшая возможность повышения ключевых параметров интегральных оптических схем и телекоммуникационных систем. Для повышения их конкурентоспособности необходим поиск новых подходов к разработке необходимой элементной базы на основе совмещения планарной технологии интегральной оптики и тонкоплёночной технологии «кремний на изоляторе».

Для кремниевых устройств методы электрооптической модуляции базируются на эффекте дисперсии свободных носителей, плотность которых зависит от уровня управляющего напряжения. В работе обсуждаются перспективы применения $p-i-n$ электрооптических модуляторов, выполненные на основе технологии «кремний на изоляторе». По сравнению с другим классом модуляторов на основе ниобата лития, исследуемые устройства потенциально имеют ряд преимуществ, таких как низкий уровень потребляемой мощности (в пределах 1 Вт), наноразмерная миниатюризация, высокая пропускная способность (полоса частот модуляции свыше 100 ГГц).

Исследуемые нанофотонные устройства являются высокотехнологичными и дорогостоящими. Их моделирование на физическом уровне важно как для понимания физических процессов, протекающих в них, так и для оптимизации их параметров с целью достижения оптимальных характеристик. На основе компьютерного моделирования в данной работе исследуется возможность оптимизации параметров наноразмерных электрооптических $p-i-n$ волноводных модуляторов, которые потенциально позволят реализовать высокоэффективную оптическую модуляцию.

Ключевые слова: кремниевая фотоника, волноводная оптическая структура, $p-i-n$ электрооптический модулятор, структура «кремний на изоляторе».

1. Введение

Оптические перестраиваемые волноводные устройства — модуляторы и переключатели относятся к числу наиболее востребованных фотонных устройств, работающих на основе спектрального уплотнения, от которых зависит дальнейшая возможность повышения ключевых параметров интегральных оптических схем телекоммуникационных систем [1–3]. С целью повышения их конкурентоспособности, например для снижения стоимости одного информационного канала, необходим поиск новых подходов к разработке элементной базы ИОС на основе совмещения планарной технологии интегральной оптики и тонкоплёночной технологии «кремний на изоляторе» (КНИ). Технология КНИ обладает высоким потенциалом для производства коммерчески доступных ИОС и оптоэлектронных устройств и имеет приоритетное значение для интегральных оптоэлектронных схем с широкомасштабной возможностью интеграции оптических и электронных функций на одном чипе [1, 2].

Методы модуляции для кремниевых устройств базируются либо на термооптическом, либо электрооптическом эффектах. Изменение реального оптического показателя преломления кремния вследствие термооптического эффекта довольно значительное [4]. Однако термооптический эффект довольно медленный и может

использоваться только для частот модуляции в пределах до 1 МГц. Для более высоких частот модуляции, до нескольких сотен мегагерц, требуются электрооптические устройства. В этом случае методы модуляции базируются на эффекте дисперсии свободных носителей [5], т. к. в ненапряжённом чистом кристаллическом кремнии отсутствует линейный электрооптический эффект (эффект Покейса), а из-за нелинейных эффектов — эффекта Франца–Келдыша и эффекта Керра показатель преломления изменяется очень-очень незначительно. Изменение концентрации свободных носителей в электрооптических устройствах может быть получено различными способами [2, 6]. С этой целью могут использоваться $p-i-n$ или МОП структуры. По сравнению с другим популярным классом модуляторов на основе ниобата лития исследуемые устройства характеризуются такими положительными свойствами, как низкий уровень потребляемой мощности (в пределах 1 Вт), наноразмерная миниатюризация, высокая пропускная способность (полоса частот модуляции свыше 100 ГГц) и высокий потенциал для монолитной интеграции с другими оптоэлектронными устройствами.

Модуляция фазы оптического пучка, распространяющегося через волноводное $p-i-n$ устройство, происходит вследствие изменения показателя преломления оптического тракта. Модуляция показателя преломления осуществляется в результате изменения концентрации свободных носителей в волноводе, которые инжектируются из высоколегированных областей. Инжектирование осуществляется при помощи внешнего управляющего напряжения. В $p-i-n$ конфигурации решающее значение имеет степень перекрытия между оптической модой и распределением неравновесного заряда в волноводе, которая напрямую обуславливает величину изменения показателя преломления. Следовательно, данный механизм будет определять и все ключевые характеристики модулятора. Поскольку исследуемые нанопотонные устройства являются высокотехнологичными и дорогостоящими, то их моделирование на физическом уровне важно для понимания физических процессов, протекающих в них. Помимо классического механизма распространения оптического пучка в КНИ волноводе, обогащённом свободными носителями [2, 6, 7], в исследуемых устройствах очень важно учесть влияние высоколегированных областей. Они существенным образом влияют на мощностные и временные характеристики устройства.

На основе компьютерного моделирования в данной работе анализируется влияние наноразмерной $p-i-n$ геометрии на ряд ключевых характеристик электрооптического модулятора, таких как потребляемая мощность, оптические потери и время переключения, а также исследуется возможность оптимизации его топологии для оценки перспективности реализации высокоэффективной оптической модуляции. Оценка модуляционных характеристик, связанных с латеральным размером устройства, например, глубина модуляции, будет проведена в последующих работах, а также частично выполнена в [4].

2. Обобщённая математическая модель

Для моделирования характеристик нанопотонного $p-i-n$ КНИ 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, 6].

Из результатов классической работы Софера и Беннетта [5] можно получить эмпирические соотношения между достигаемым изменением реальной части показателя преломления и возникающим при этом дополнительным поглощением на свободных носителях. Исходя из значений концентрации электронов и дырок в любой точке $p-i-n$ структуры (вычисленных с помощью уравнений Пуассона и непрерывности) рассчитывается изменение показателя преломления и поглощения оптического излучения, которые определяются дисперсией свободных носителей, инжектированных из высоколегированных областей. Это полностью характеризует взаимосвязь оптических и полупроводниковых свойств волноводной

структуры модулятора при произвольных приращениях действительной части показателя преломления, что позволяет осуществить поиск оптимальных параметров волноводной структуры.

2.1. Топология структуры

Поперечное сечение анализируемой конфигурации $p-i-n$ КНИ волноводной структуры приведено на рис. 1. Его волноводная часть — это гребенчатый волновод (1) с высотой H и шириной W , расположенный на толстом слое погружённого окисла кремния SiO_2 (2). Высота ребра h_r и высота основания h_s гребенчатого волновода связаны соотношениями: $H = h_r + h_s$ и $h_r \gg h_s$. Оптическое ограничение обеспечивается как погружённым окислом (2) и плакирующим слоем SiO_2 , который покрывает всю структуру (не показан на рис. 1). В основании гребенчатого волновода (1) относительно каждой боковой грани ребра сформированы высоколегированные $p+$ и $n+$ области (4) с концентрацией $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Протяжённость этих областей и расстояние до соответствующих боковых граней ребра обозначены как w_d и w_s соответственно. Тогда параметр $W = W_r + 2(w_d + w_s)$, где W_r — ширина гребня. Центральная часть волноводной структуры (гребень и часть основания) — низко легированные области. Они легируются примесью n -типа с концентраций 10^{15} см^{-3} .

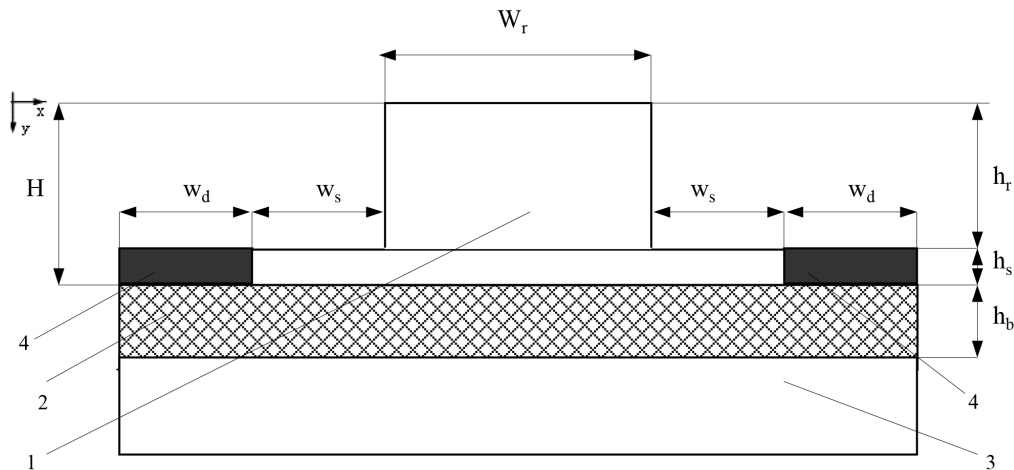


Рис. 1. Поперечное сечение $p-i-n$ КНИ волноводной структуры: 1 — кремниевый гребенчатый волновод, 2 — SiO_2 погружённый окисел, 3 — подложка, 4 — высоколегированные области

Погружённый окисел (2) обеспечивает также электрическую изоляцию. Его наличие существенно уменьшает величину ёмкости не только между высоколегированными областями, но также и величины ёмкостей высоколегированная область-подложка за счёт исключения донной ёмкости [3, 7].

2.2. Моделирование характеристик

Для расчёта распределения носителей в волноводной области использовался коммерчески доступный двумерный пакет программ моделирования *Atlas* фирмы *Silvaco* [8]. Применимость этого программного обеспечения (ПО) для моделирования предложенного устройства демонстрировалась в работах [6, 9], в которых анализировались электрооптические модуляторы на КНИ волноводах. Используемое ПО моделирует на физическом уровне характеристики полупроводниковых

устройств, решая численно уравнения Пуассона и уравнения неразрывности для электронов и дырок. Данное ПО позволяет осуществить полный статистический подход (статистика Ферми–Дирака), когда, например, рассматривают высоколегированные области. Модели рекомбинации носителей включают рекомбинацию Шокли–Рида–Холла (ШРХ), Оже рекомбинацию и поверхностную рекомбинацию. Пакет программ моделирования также включает тепловое моделирование, которое включает омический нагрев, нагревание и охлаждение из-за генерации носителей и рекомбинации, температуру окружающей среды и определённый теплоотвод структуры.

Для вычисления распределения оптических полей в волноводной структуре и оптических потерь из-за поглощения носителей использован метод распространения луча (*beam propagation method (BMP)*), реализованный в коммерческом ПО BeamPROP [10].

3. Результаты моделирования

3.1. Исходные физические параметры

Для моделирования характеристик приняты значения основных физических и ряда топологических параметров, свойственных для кремниевых электрооптических модуляторов [2, 6, 9, 11, 12], которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения основных физических и ряда топологических параметров, свойственных для кремниевых электрооптических модуляторов

Параметры	Значение
длина волны света в вакууме, нм	1552
температура, К	298
показатель преломления кремния	3,47
показатель преломления окиси кремния	1,44
высота волновода, нм	210
апертура гребня, нм	300
толщина погружённого слоя, нм	940
теплопроводность кремния, Вт(см·К) ⁻¹	1,55
теплоёмкость кремния, Дж·см ³	1,67

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. Как отмечено в [13], влияния 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 $1,6 \times 10^{-7}$ Ом·см² и $8,9 \times 10^{-7}$ Ом·см², на высоко легированных n и p областях соответственно. Кроме того, электрические контакты, как полагали, функционируют также как тепловые контакты или теплоотводы при фиксированной температуре 298 К.

Остальные ёмкостные характеристики $p-i-n$ КНИ модулятора не учитывались, поскольку, как упоминалось выше, одно из главных преимуществ КНИ технологии состоит в существенном уменьшении паразитных ёмкостей, определяющих время переключения. Тем не менее при практическом применении $p-i-n$ КНИ модулятора принимаемое допущение требует детального рассмотрения.

3.2. Модуляционные характеристики

Волноводная структура $p-i-n$ КНИ модулятора является одномодовой для ТЕ и ТМ поляризаций для толщин основания h_s в диапазоне до 80 нм, что подтверждается прямыми расчётами методом ВМР [10]. Интеграл перекрытия оптических полей полоскового волновода и волноводного ребра отражает как изменение распределения поля в полосковом волноводе влияет на общее распределение поля во всей волноводной структуре. Зависимость интеграла перекрытия оптических полей полоскового волновода и волноводного ребра от параметра h_s приведена на рис. 2.

Следует отметить, что величина интеграла перекрытия в рассматриваемом диапазоне значений h_s практически постоянна. Это позволяет сделать вывод, что использование тонкого основания не влияет на распределение моды в ребре волноводной структуры.

Потребляемая мощность — один из ключевых параметров данного типа устройств. Механизмы, определяющие её значение, находятся в конкурирующих отношениях. Необходимость обеспечить оптимальные инжекционные условия [9] диктует увеличение потребляемой мощности, а минимизация влияния термооптического эффекта достигается снижением потребляемой мощности. 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 приблизительно составляет $3,3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, которая вызывает изменение показателя преломления $\Delta n = -1,1 \times 10^{-3}$.

Скорость поверхностной рекомбинации носителей на поверхности раздела между кремниевым волноводом и окружением SiO_2 является одним из основных факторов, ограничивающих модуляционные характеристики устройств. Для этих условий на рис. 3 представлена численно рассчитанная характерная зависимость удельной потребляемой статической мощности от скорости рекомбинации. Принято, что при скорости $S_n = S_p = 1 \text{ см/с}$ уровень потребляемой мощности равен единице.

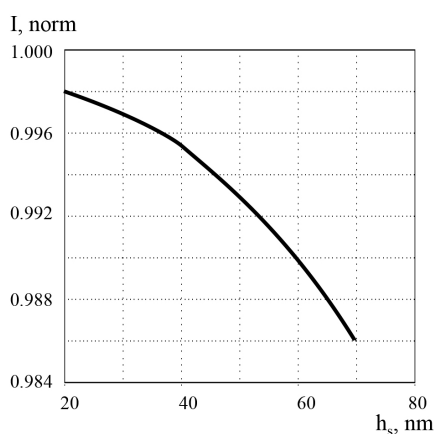


Рис. 2. Зависимость интеграла перекрытия оптических полей ребра и основания от толщины основания

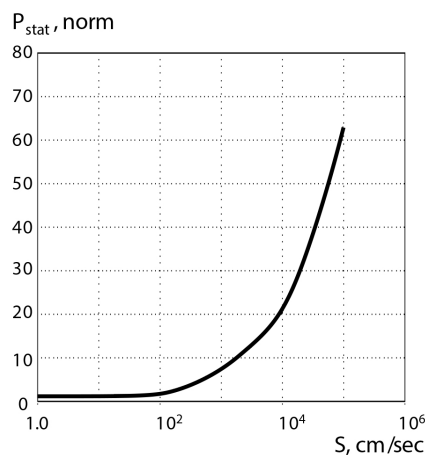


Рис. 3. Нормированная зависимость удельной потребляемой статической мощности от скорости поверхностной рекомбинации

Отметим, что для скорости рекомбинации $S_n = S_p = 10^2$ см/с (где S_n , S_p — скорость поверхностной рекомбинации электронов и дырок соответственно), которая соответствует случаю поверхности волновода с пассивированным термически выращенным SiO_2 [12], 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} К. Напротив, при $S_n = S_p = 10^5$ см/с (поверхностное пассивирование отсутствует) потребляемая мощность резко возрастает по сравнению с идеальным случаем. Это также приводит к существенному снижению концентрации инжектированных носителей.

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 это перекрытие. С другой стороны, расстояние w_s должно быть достаточно коротким, 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 .

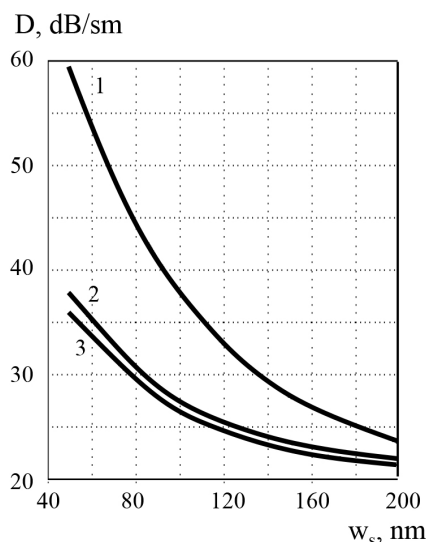


Рис. 4. Зависимость оптических потерь от расстояния между гранью гребня и краем высоко легированной области при разных h_s : 1 — $h_s = 50$ нм, 2 — $h_s = 30$ нм, 3 — $h_s = 20$ нм

Следует отметить, что потери высоки для $w_s < 50$ нм (37–59 дБ/см) во всём диапазоне рассматриваемых значения h_s . Это вызвано тем, что близость высоколегированных областей к ребру увеличивает перекрытие с оптической модой. С другой стороны, потери значительно ниже, когда легированные области отодвинуты от боковой грани ребра. Например, при $w_s = 200$ нм потери оцениваются 22–23 дБ/см в режиме ОН (инжектирование носителей). 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 высоко легированные области, увеличивая потери. 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 равная 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 [12].

Время переключения устройства из состояния в состояние определяется процессами либо диффузии либо удаления носителей из внутренней области волноводной структуры. Данный параметр напрямую связан с полосой модуляции. Для изменения показателя преломления считаем, что время включения (t_{ON}) — это время, требуемое для его изменения от 0,1 до 0,9 его максимального абсолютного значения Δn . Аналогично время выключения (t_{OFF}) определено как время, необходимое для его изменения от 0,9 до 0,1 его максимального абсолютного значения. Для модельного случая структуры с $h_s = 20$ нм и $w_s = 100$ нм для переключающего импульса напряжения в состояние ON с параметрами $U_{OFF} = -1$ В и $U_{ON} = 0,82$ В значения t_{ON} и t_{OFF} составляют 0,84 и 0,14 нс. Суммарное время составляет менее 1 нс. Потребляемая статическая мощность составляет 1,45 Вт/м.

Уменьшение параметра W_r позволяет снизить суммарное время t_s перехода OFF-ON-OFF ($t_s = t_{ON} + t_{OFF}$) за счёт повышения локализации поля оптической моды. Однако такое масштабирование возможно только в ограниченном диапазоне значений, который связан с нарушением оптимальных условий распространения оптической моды в волноводе и в конечном итоге с её отсечкой. На рис. 5 представлены результаты моделирования времени t_s как функции W_r для значения $h_s = 20$ нм. Минимальное значение времени t_s составляет менее 0,63 нс. Для базовой длины модулятора 2,5 мм [6, 9, 11] уровень потребляемой мощности составляет 2,9 мВт, величина оптических потерь 6,5 дБ. Полученные результаты положительным образом характеризуют возможность реализации высокоэффективной оптической модуляции на основе наноразмерной волноводной *p-i-n* КНИ структуры.

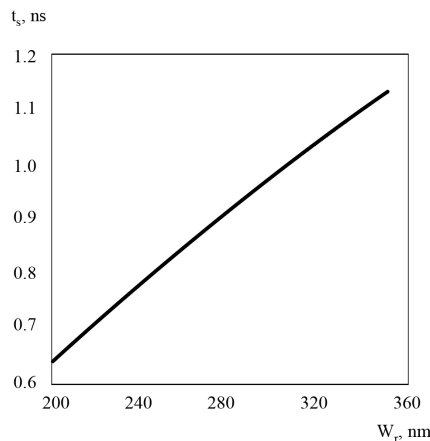


Рис. 5. Зависимость суммарного времени переключения от ширины ребра волновода

В случае топологических параметров, близких к предельным значениям, повышение температуры модулятора происходит во время перехода из ON-состояния в OFF-состояние, в результате значительного увеличения переходного обратного тока. Максимальное увеличение температуры составляет 0,16 К. Оно совершается броском (резким подъёмом и плавным спадом практически до первоначального

уровня) за время чуть меньшее 1 нс. Это указывает на эффективный отвод тепла через тепловые контакты и незначительный термооптический эффект.

В результате рассмотренная конфигурация КНИ модулятора обладает также и возможностью обеспечить решение проблемы диссипации тепловой мощности. Как известно, задача снижения мощности тепловых потерь электронных устройств является ключевой для всей современной микроэлектроники. И одним из наиболее эффективных способов её решения является пониженное напряжение питания. Это хорошо согласуется со способностью исследованного нанофотонного $p-i-n$ модулятора потреблять меньшую электрическую мощность с сохранением той же производительности.

4. Заключение

На основе численных решений исследован ряд ключевых модуляционных характеристик нанофотонного $p-i-n$ модулятора на структуре «кремний на изоляторе» 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 общим размером по высоте 210 нм и ширине 600 нм, высоте основания 20 нм и расстоянию от высоко легированных областей до ребра 100 нм для импульсного переключения управляющего напряжения -1 В и 0,82 В время переключения составляет 0,63 нс и потребляемая мощность 1,15 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. International Technology Roadmap for Semiconductor 2014 Edition. — <http://public.itrs.net>.
2. *Soref R.* The Past, Present, and Future of Silicon Photonics // J. Sel. Top. Quantum Electron. — 2006. — Vol. 12. — Pp. 1678–1687.
3. Devices and Architectures for Photonic Chip-Scale Integration / J. Ahn, M. Fiorentino, R. G. Beausoleil et al. // App. Phys. A. — 2009. — Vol. 95. — Pp. 989–997.
4. Silicon Thermo-Optical Micro-Modulator with 700 kHz and 3 dB Bandwidth / C. Cocorullo, M. Iodice, I. Rendina, P. M. Sarro // Photon. Technol. Lett. — 1995. — Vol. 7. — Pp. 363–365.
5. *Soref R., Bennett B.* Electro Optical Effects in Silicon // J. Quantum Electron. — 1987. — Vol. 23. — Pp. 123–129.
6. Silicon Photonics / M. Salib, L. Liao, R. Jones et al. // Intel Technology Journal. — 2004. — Vol. 8. — Pp. 143–160.
7. Nanophotonic Waveguides in Silicon-on-Insulator Fabricated with CMOS Technology / W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon et al. // J. of Lightwave Technology. — 2005. — Vol. 23. — Pp. 401–412.
8. Silvaco International. — 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054. — <http://www.silvaco.com>.
9. *Hewitt P. D., Reed G. T.* Improved Modulation Performance of a Silicon p-i-n Device by Trench Isolation // J. Lightwave Technology. — 2001. — Vol. 19. — Pp. 387–395.
10. Rsoft Photonic CAD. — RSoft Design Group, Inc. — <http://www.rsoftdesign.com>.

11. Масальский Н. В. Характеристики субмикронного фотонного фазового модулятора на структуре «кремний на изоляторе» // Нано и микросистемная техника. — 2013. — № 10. — С. 38–42.
12. 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 // J. Lightwave Technology. — 1997. — Vol. 15. — Pp. 505–511.
13. Contact Resistivities and Electrical Characteristics of Co/Si Contact by Rapid Thermal Annealing / O. Nakatsuka, T. Ashizawa, H. Iwano et al. // Proc. Adv. Metallization Conf. — AMC1998. — Vol. 784. — Warrendale, PA: 1999. — Pp. 605–610.

UDC 621.372.8

Modulated Characteristics of Nanosize $p-i-n$ SOI Units

N. V. Masalsky

*Department of Applied Mathematics and Computer Science
Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences
36-1, Nahimovskiy pr., Moscow, Russia, 117218*

Optical waveguide devices — modulators and switches are one of the most demanded photon devices on whom further possibility of increase of keyword parameters of integrated optical circuits and telecommunication systems depends. Search of new development approaches of necessary element basis on the basis of combination of planar technology of integrated optics and the thin-film technology “silicon on an insulator” is necessary for increase of their competitiveness.

For silicon devices methods of electrooptical modulation are based on effect of dispersion of the free carriers which density depends on the level of applied voltage. In operation the perspectives of application of $p-i-n$ of electrooptical modulators executed on the basis of the “silicon on an insulator” technology are discussed. In comparison with other class of modulators on the basis of lithium niobate, the researched devices potentially have a row of advantages, such as the low level of power consumption (within 1 W), nanosized miniaturization, high throughput (modulation frequency band over 100 GHz).

The researched nanophoton devices are hi-tech and expensive. Their simulation at the physical layer is important and as for understanding of the physical processes proceeding in them and for optimization of their parameters for the purpose of achievement of optimum characteristics. On the basis of computer simulation in this operation possibility of optimization of parameters of nanosized electrooptical $p-i-n$ of the waveguide modulators which potentially will allow to realize highly effective optical modulation is researched.

Key words and phrases: silicon photonic, waveguide optic structure, $p-i-n$ electrooptical modulator, silicon-on-insulator structure.

References

1. International Technology Roadmap for Semiconductor 2014 Edition.
URL <http://public.itrs.net>
2. R. Soref, The Past, Present, and Future of Silicon Photonics, J. Sel. Top. Quantum Electron. 12 (2006) 1678–1687.
3. 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, Devices and Architectures for Photonic Chip-Scale Integration, App. Phys. A. 95 (2009) 989–997.
4. C. Cocorullo, M. Iodice, I. Rendina, P. M. Sarro, Silicon Thermo-Optical Micro-Modulator with 700 kHz and 3 dB Bandwidth, Photon. Technol. Lett. 7 (1995) 363–365.
5. R. Soref, B. Bennett, Electro Optical Effects in Silicon, J. Quantum Electron. 23 (1987) 123–129.

6. M. Salib, L. Liao, R. Jones, M. Morse, A. Liu, D. Samara-Rubio, D. Alduino, M. Paniccia, Silicon Photonics, Intel Technology Journal 8 (2004) 143–160.
7. W. Bogaerts, R. Baets, P. Dumon, V. Wiaux, S. Beckx, D. Taillaert, B. Luyssaert, J. Campenhout, P. Bienstman, D. Thourhout, Nanophotonic Waveguides in Silicon-on-Insulator Fabricated with CMOS Technology, J. of Lightwave Technology 23 (2005) 401–412.
8. Silvaco International, 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054.
URL <http://www.silvaco.com>
9. P. D. Hewitt, G. T. Reed, Improved Modulation Performance of a Silicon p-i-n Device by Trench Isolation, J. Lightwave Technology 19 (2001) 387–395.
10. Rsoft Photonic CAD, RSoft Design Group, Inc.
URL <http://www.rsoftdesign.com>
11. N. V. Masalsky, Characteristics of Submicron Photonic Phase Modulator on “Silicon on Insulator” Structure, Nano and Microsystem Technology (10) (2013) 38–42, in Russian.
12. A. Cutolo, M. Iodice, P. Spirito, L. Zeni, Silicon Electro-Optic Modulator Based on a Three Terminal Device Integrated in a Low-Loss Single-Mode SOI Waveguide, J. Lightwave Technology 15 (1997) 505–511.
13. O. Nakatsuka, T. Ashizawa, H. Iwano, S. Zaima, Y. Yasuda, Contact Resistivities and Electrical Characteristics of Co/Si Contact by Rapid Thermal Annealing, in: Proc. Adv. Metallization Conf. – AMC1998, Vol. 784, Warrendale, PA, 1999, pp. 605–610.