

Моделирование электрооптического модулятора на основе вертикального $p-n$ -перехода в структуре кремний-на-изоляторе

А.В.Царев, Р.М.Тазиев

Представлены результаты численного моделирования электрооптического модулятора Маха–Цендера с применением делителей пучка на основе многомодовой интерференции в структуре кремний-на-изоляторе. Управление обеспечивается за счет эффекта обеднения в вертикальном $p-n$ -переходе, который может быть изготовлен с помощью технологической процедуры самовыравнивания. Предложена оптимальная конструкция модулятора, согласованного с внешней 50-омной нагрузкой, для которого при величине обратного смещения -5 В и активной длине 1.7 мм возможна реализация рабочей полосы оптических частот ~ 50 ГГц. Предложен особый профиль легирования $p-n$ -перехода модулятора, обеспечивающий оптическую полосу частот 30 ГГц при обратном смещении -3 В и длине модулятора 2.5 мм. Такие модуляторы могут найти применение в устройствах интегральной оптики, оптической связи и радиофотоники.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, кремний-на-изоляторе, $p-n$ -переход, численное моделирование, интегральная оптика, радиофотоника.

1. Введение

Технологии интегральной оптики и нанофотоники входят в круг критических технологий, без которых невозможно развитие информационного общества. С их помощью удалось добиться существенного прогресса в технических параметрах (эффективность, миниатюризация, быстродействие и т. д.) оптоэлектронных элементов и систем для оптической связи, радиофотоники, систем обработки и передачи данных. Сверхвысокочастотные (СВЧ) электрооптические (ЭО) модуляторы составляют основу множества элементов радиофотоники. Работа модулятора основана на согласованном взаимодействии СВЧ и оптических волн в оптоэлектронном устройстве типа электродная структура–оптический волновод, в котором амплитуда или фаза оптической волны изменяется под действием прикладываемого электрического напряжения.

Исторически наиболее распространены ЭО модуляторы на основе ниобата лития [1–3]. Они позволяют работать на частотах до 40 ГГц. Технология их изготовления хорошо отработана, они надежны и термостойки, однако отличаются большой длиной и имеют существенное ограничение по рабочей частоте СВЧ модуляции.

Для достижения полосы частот модулятора порядка 100 ГГц могут применяться современные электрооптические полимеры с высоким электрооптическим коэффициентом (превышающим 100 пм/В) [4]. Наилучшие результаты по управляющему напряжению и достигнутой поло-

се частот реализованы в гибридных кремнийорганических модуляторах, работающих в режиме бегущей волны, с использованием щелевых волноводов и/или фотонных кристаллов с заполнением из электрооптического полимера [5, 6]. Недостатком таких модуляторов является необходимость работы при низком уровне оптической мощности проходящего сигнала (из-за высокой плотности энергии в щелевом волноводе), что критично для устройств радиофотоники.

Альтернативным решением является использование полностью полимерных электрооптических модуляторов на основе волноводов гребенчатого типа [7–13], имеющих большое сечение оптической моды и, следовательно, способных работать при оптической мощности, на два порядка большей [11], чем щелевые волноводы. К сожалению, из-за меньшей эффективности управления данные модуляторы также имеют сравнительно большую длину (несколько сантиметров), что приводит к значительным величинам (несколько вольт) управляющего напряжения из-за потерь СВЧ волны и рассогласования скоростей оптической и СВЧ волн в структуре модулятора, работающего в режиме бегущей волны. На основе численных экспериментов нами было показано [14], что за счет использования диэлектрических полосок из MgO, имеющих высокую диэлектрическую проницаемость, можно значительно (до 2.8 раза) снизить величину полуволнового управляющего напряжения при работе в полосе частот ~ 100 ГГц. К сожалению, технология изготовления пленок MgO оптимизирована для изготовления сверхтонких (1–100 нм) слоев, а создание пленок необходимой толщины (несколько микрон) является сложной технологической проблемой, препятствующей практической реализации преимуществ данной концепции электрооптических модуляторов.

Очень перспективны модуляторы на основе квантово-размерного эффекта Штарка в слоистых структурах с множественными квантовыми ямами [15–17], выращенных послойной эпитаксией на подложках из фосфида индия

А.В.Царев. Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: tsarev@isp.nsc.ru

Р.М.Тазиев. Институт физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13; e-mail: taziev@isp.nsc.ru

Поступила в редакцию 22 марта 2019 г., после доработки – 24 апреля 2019 г.

(InP). Они реализованы в очень компактных оптических элементах и, кроме того, их можно создать в монокристаллической структуре совместно с источниками или приемниками оптического излучения. К основному недостатку таких модуляторов относится высокая стоимость их изготовления.

Хорошей альтернативной платформой для создания СВЧ модуляторов является кремниевая фотоника, которая в последнее десятилетие вошла в число наиболее востребованных технологий для разработки и изготовления фотонных элементов и приборов [18–24]. Ее несомненным достоинством является высокая совместимость с КМОП-технологией микро- и нанoeлектроники, а также практическая возможность реализации на единой технологической платформе большинства базовых компонентов монокристаллических интегрально-оптических схем. В настоящее время ведутся интенсивные разработки источника лазерного излучения и электрооптического модулятора в интегральном исполнении на основе кремния, но данная проблема нами здесь не рассматривается.

2. Постановка задачи

Анализ современной научной литературы показывает, что подавляющее большинство кремниевых электрооптических модуляторов создается на основе структур кремний-на-изоляторе (КНИ), в которых оптический волновод располагается на толстом (~2 мкм) заглубленном слое окисла [18–25]. Такой слой обеспечивает оптическую изоляцию от кремниевой подложки, на которой формируется СВЧ модулятор, являющийся независимым оптическим элементом или частью более сложной оптической интегральной схемы.

Технология развития кремниевых электрооптических модуляторов прошла большой путь от низкочастотных элементов, работающих на основе инжекции носителей заряда, до СВЧ элементов, способных работать на частотах до 40 ГГц и имеющих на порядок меньшие размеры, чем аналогичные модуляторы на основе ниобата лития. Быстродействие таких элементов обеспечивается работой p-n-перехода в режиме обеднения, а также применением схемы модулятора бегущей волны.

Электрооптическое управление полупроводникового модулятора осуществляется за счет изменения концентрации свободных носителей [26] в области p-n-перехода волновода, где распространяется оптическая волна. При этом изменяется комплексная константа распространения оптической моды, что приводит к зависимости амплитуды и фазы оптической волны от управляющего напряжения. Для работы модулятора, как правило, используется фазовая модуляция волны. Для перевода фазовой модуляции в амплитудную обычно применяются структуры типа кольцевого резонатора либо модуляторы на основе интерферометра Маха–Цендера. Первые имеют малые размеры, но требуют точного контроля длины волны излучения, на которой работает модулятор. Вторые имеют большие размеры (до нескольких миллиметров), но способны работать в широком диапазоне длин волн и менее чувствительны к изменению температуры. Для двукратного снижения управляющего напряжения применяется двухтактный (push–pull) модулятор, при использовании которого СВЧ волна модулирует в противофазе волны в двух плечах оптического интерферометра Маха–Цендера.

Обычно кремниевые модуляторы работают на основе горизонтального p-n-перехода [24], характеристики кото-

рого очень чувствительны к точности его позиционирования по ширине гребня волновода, имеющего малый характерный размер (0.5–0.6 мкм). Недавно была предложена конструкция модулятора на основе вертикального p-n-перехода [30–32], изготавливаемого с использованием технологической процедуры самовыравнивания [30]. Достижимая полоса рабочих частот модуляторов на вертикальных p-n-переходах значительно уступает модуляторам на горизонтальных p-n-переходах [33]. Тем не менее, если решить проблему увеличения рабочей полосы частот модуляторов с вертикальным p-n-переходом, их более высокая эффективность [33] и более воспроизводимая технология изготовления сделают усилии по разработке модуляторов на вертикальных p-n-переходах оправданными с точки зрения их практического использования.

В настоящей работе выполнен численный анализ и проведена оптимизация параметров электрооптических СВЧ модуляторов на основе вертикального p-n-перехода на КНИ. Это позволило определить структурные параметры модулятора, обеспечивающие одновременно малую величину управляющего напряжения и широкую полосу рабочих частот, сравнимую с полосами лучших модуляторов на горизонтальных p-n-переходах. Для снижения управляющего напряжения и согласования модулятора с 50-омной нагрузкой предложен оригинальный профиль легирования полупроводника донорами, при котором гребень волновода имеет низкую концентрацию свободных носителей заряда (электронов), а примыкающая к гребню область – высокую. Численное моделирование выполнялось с помощью специализированного коммерческого пакета RSoft [34] с утилитой MultiPhysics Carrier Utility для расчета возмущения показателя преломления в полупроводниковой структуре при модуляции ее внешним электрическим полем. Для моделирования СВЧ свойств активной части модулятора, где происходит модуляция света СВЧ волной, можно применять специализированные СВЧ пакеты, например CST Microwave Studio [35] или ANSYS HFSS [36]. В данной работе использовался СВЧ пакет ANSYS HFSS.

3. Оптические свойства интерферометра Маха–Цендера

В качестве оптической схемы модулятора выбрана классическая схема интерферометра Маха–Цендера, позволяющая перевести управляемое изменение фазы оптической волны при ее распространении в области p-n-перехода в амплитудную модуляцию на выходе интерферометра. Сам интерферометр Маха–Цендера сформирован с помощью делителей пучка на основе многомодовой интерференции (ММИ), причем на входе устройства используется элемент ММИ 1×2 , а на выходе – ММИ 2×2 (рис.1). Отличительное свойство данной оптической схемы заключается в том, что интерферометр находится в рабочей точке (равные амплитуды левого и правого каналов) при нулевом сдвиге фаз оптической волны в разных плечах на выходе интерферометра. Кроме того, данная схема отличается малыми вносимыми потерями, высокой устойчивостью к ошибкам изготовления и широкой полосой рабочих длин волн (рис.2). Весь численный анализ выполнен для одномодового оптического гребенчатого волновода в структуре кремний-на-изоляторе с шириной и высотой гребня 600 и 200 нм соответственно, который располагается на планарном основании толщи-

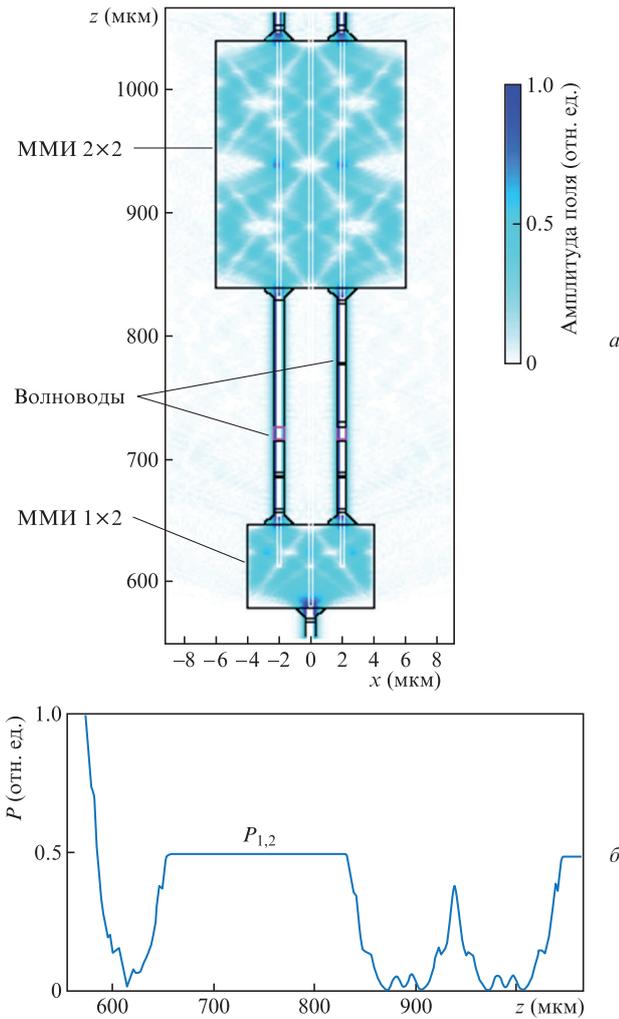


Рис.1. Оптическая схема интерферометра Маха–Цендера с применением элементов ММИ 1×2 и 2×2 , а также поперечное распределение амплитуды поля оптической волны по мере ее распространения (а) и изменение мощности относительно уровня входного сигнала для фундаментальной моды по мере ее распространения по структуре для левого (P_1) и правого (P_2) плеч интерферометра Маха–Цендера (совпадают для нулевого сдвига фаз волн в плечах интерферометра). Расчет велся трехмерным методом распространяющегося пучка (3D BPM) (б).

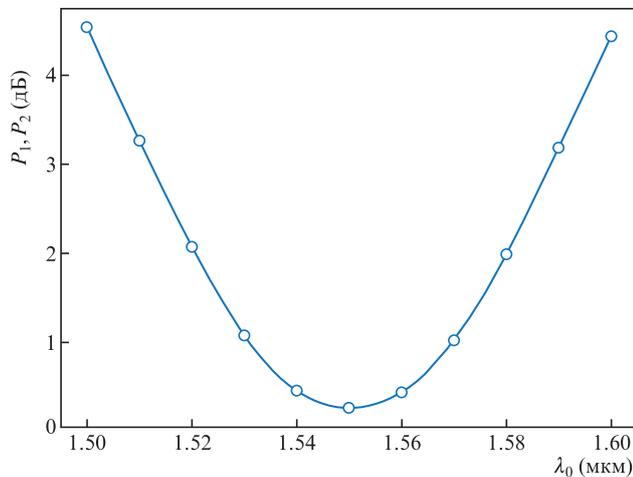


Рис.2. Спектральная зависимость оптической мощности P_1 и P_2 , на выходе интерферометра Маха–Цендера (см. рис.1). Расчет методом 3D BPM.

ной 200 нм, отделенном от кремниевой подложки окисным буферным слоем толщиной 2 мкм.

Известно, что кремний обладает высокой нелинейностью, которая может приводить к паразитным эффектам даже при умеренной мощности проходящего излучения [37]. Для ее уменьшения нами выбрана структура с большим, чем обычно, поперечным сечением. Кроме того, планарное основание толщиной 200 нм оптимально для изготовления решеточных элементов связи, а фундаментальная мода данного гребенчатого волновода с пренебрежимо малыми потерями может быть трансформирована с помощью инвертированного клина в широкий пучок, распределяющийся в планарном основании [38], для последующего введения с помощью дифракционной решетки в одномодовое оптическое волокно.

Известно, что эффективность электрооптического управления на р–п-переходе с обратным смещением уменьшается с ростом размеров волновода, т. к. снижается относительная доля изменяемой части области обеднения. Однако в данной статье показано, что волноводная структура с выбранными нами параметрами обладает очень хорошими характеристиками с точки зрения создания перспективных типов электрооптических модуляторов на кремнии.

4. Оптические свойства вертикального р–п-перехода

Принципиальная схема структуры вертикального р–п-перехода модулятора приведена рис.3. Технология изготовления таких структур описана в [30–32]. В данном случае она представляет собой гребенчатый волновод на подложке р-типа, в котором созданы дополнительные области р⁺⁺- и п⁺⁺-типов. Нас интересуют оптические свойства данных структур, зависящие от концентрации донорных и акцепторных примесей, геометрических параметров и физических свойств КНИ.

В процессе расчета сначала находится распределение электрического потенциала с учетом уровня легирования всех слоев, а затем рассчитываются изменения действительной и мнимой частей показателя преломления, зависящие от концентрации свободных носителей заряда. После этого анализируется распространение оптической и СВЧ волн по волноводной структуре, свойствами которой управляет внешнее электрическое поле.

Расчеты, выполненные с помощью пакета от RSoft, показывают, что на оптические свойства данных структур можно эффективно воздействовать внешним электрическим полем, которое вызывает значительные изменения действительной и мнимой частей показателя преломления моды, распространяющейся по волноводу. Физическая причина этого заключается в том, что с изменением управляющего напряжения существенно изменяется размер областей обеднения (электронами и дырками, обо-

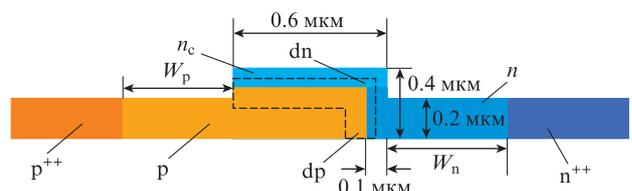


Рис.3. Поперечный срез легирующих областей электрооптического модулятора на основе вертикального р–п-перехода.

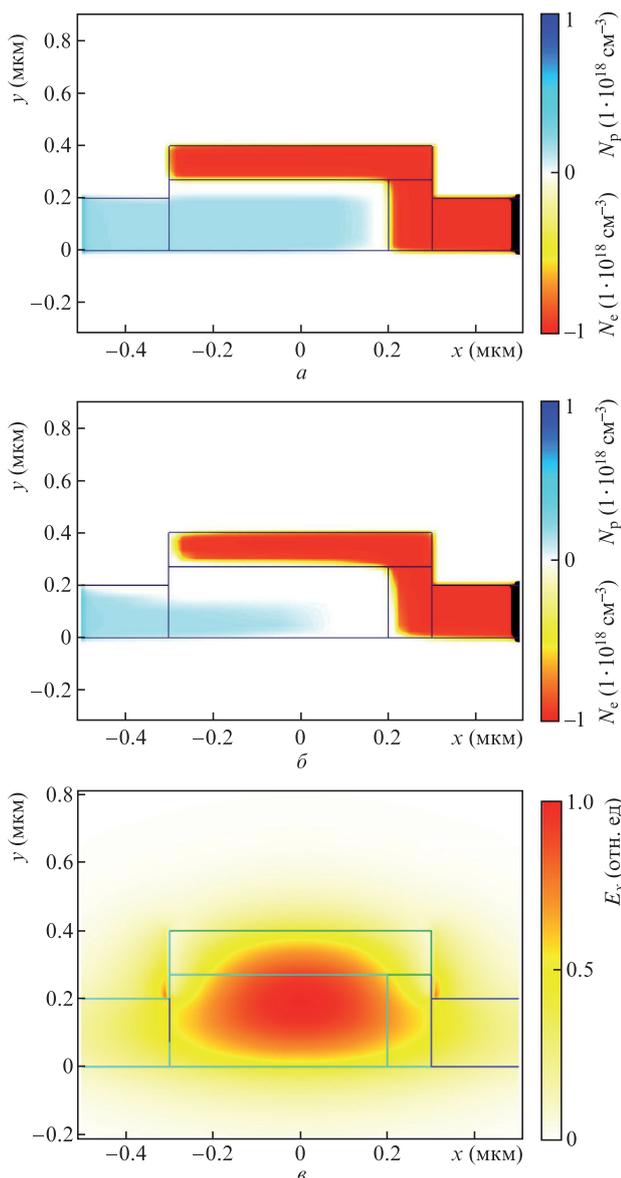


Рис.4. Распределения концентраций свободных носителей заряда для нулевого напряжения смещения (а) и напряжения -5 В (б) – дырок (N_p) и электронов (N_e), а также поперечное распределение поля фундаментальной моды гребенчатого волновода для нулевого напряжения смещения (в) при $N_A = 3 \times 10^{17}\text{ см}^{-3}$, $N_D = 14 \times 10^{17}\text{ см}^{-3}$. Расчет методом 3D BPM. Цветные варианты рис.4, 5 и 7 помещены на сайте журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

значены на рис.3 dn и dp соответственно), которые отвечают за изменение показателя преломления, связанное с концентрацией свободных носителей [26]. В частности, на рис.4 приведены поперечные распределения концентраций свободных носителей заряда (дырок и электронов) для двух разных значений управляющего напряжения. Для оптимальной конструкции модулятора максимальные значения поля фундаментальной моды оптического волновода (рис.4,в) совпадают с областью максимального изменения концентрации свободных носителей (рис.4,а, рис.4,б) и, следовательно, с областью максимального изменения показателя преломления (рис.5). Все это обеспечивает высокую эффективность электрооптического управления фазой оптической волны в кремниевом оптическом волноводе.

Нашей задачей является поиск таких параметров структуры, приведенной на рис.3, при которых имеет место значительное изменение фазы оптической волны в процессе ее распространения в волноводе при относительно малом затухании оптической и СВЧ волн для обеспечения широкой полосы СВЧ модуляции. Затухание СВЧ волны зависит квадратично от частоты и электрической емкости p-n-перехода, которая в свою очередь зависит как от уровня допирования, так и от электрического потенциала обратного смещения на p-n-переходе. Кроме того, затухание оптической волны зависит от геометрии поперечного сечения оптического волновода. Как показали численные исследования, проводимые во многих лабораториях, параметры допирования, оптимальные для достижения минимального затухания и максимального изменения фазы оптической волны, не оптимальны для параметров СВЧ волны. Все это приводит к тому, что данная задача является многопараметрической и она не имеет единственного решения, т. к. параметры оптимизации влияют на свойства оптической и СВЧ волн противоположным образом. Единственный вариант разрешения этого противоречия – найти субоптимальные («компромиссные») параметры допирования для уменьшения затухания оптической и СВЧ волн, которые могут быть использованы для решения конкретной практической задачи.

Известно [32], что с точки зрения управления фазой оптической волны дырки предпочтительнее электронов, т. к. при прочих равных условиях они вызывают меньшее затухание оптической волны [26]. Поэтому в электрооптических модуляторах на кремнии дырки обычно занимают большую часть структуры в области локализации волноводной оптической моды. Кроме того, для лучшего управления размером области обеднения концентрация электронов должна быть больше концентрации дырок. Оба этих фактора учтены в наших расчетах, в которых мы изменяли уровень легирования акцепторами N_p (для контроля концентрации свободных дырок) и донорами N_n (для контроля концентрации свободных электронов). При численном анализе использовано однородное распределение профиля легирования по толщине структуры p-n-перехода, типичное для технологической процедуры самовывравнивания [30]. Последняя заключается в том, что сначала проводится легирование акцепторами для формирования планарного основания с дырочной проводимостью и изготавливается дополнительный тонкий верхний слой n-типа (с концентрацией свободных носителей n_c). Затем формируется маска, через которую путем травления формируется гребень волновода, и далее через ту же маску путем ионной имплантации донорами (под углом к поверхности) формируется дырочный слой (с концентрацией свободных носителей n) справа от гребня в планарном основании (см. рис.3). Сильнолегированные области p^{++} - и n^{++} -типов и управляющие электроды формируются при последующих технологических операциях.

Нас интересуют субоптимальные концентрации доноров и акцепторов в области p-n-перехода. Сильнолегированные p^{++} - и n^{++} -области находятся вдали от области локализации фундаментальной моды волновода и слабо влияют на эффективность электрооптического взаимодействия. Они необходимы для создания электрических контактов и их свойства несущественны при решении вопроса об оптимизации электрофизических параметров модулятора.

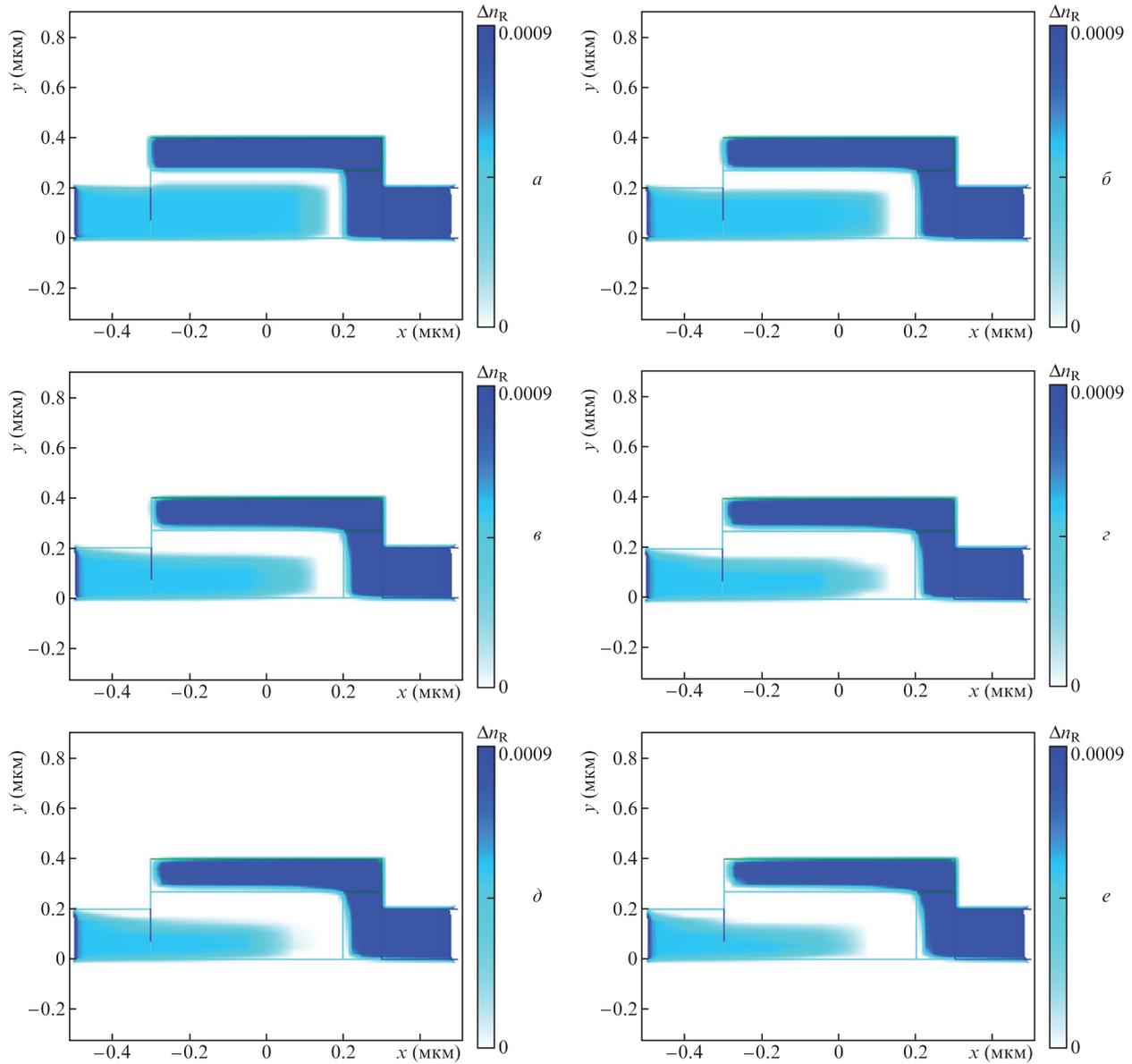


Рис.5. Поперечное распределение возмущения действительной части показателя преломления при обратных смещениях $V = 0$ (а), 1 (б), 2 (в), 3 (г), 4 (д), 5 В (е); $N_A = 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 14 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Расчет с использованием оптического пакета от RSoft.

В качестве критических параметров для описания оптических свойств модулятора в работе использованы два основных: $L_{\pi/2}$ – характерная длина фазосдвигающего элемента модулятора и $L_{\text{loss}\pi/2}$ – соответствующее затухание оптической волны, которое необходимо для обеспечения сдвига ее фазы на $\pi/2$, соответствующего полному переключению сигнала двухтактного (push–pull) модулятора при заданном напряжении V между областями n^{++} и p^{++} . Известно, что характеристика данного типа электрооптического модулятора нелинейна (рис.6), поэтому оптимизацию параметров электрооптического модулятора следует проводить с учетом его геометрии, предполагаемого рабочего напряжения, а также требуемой полосы рабочих частот. Наши расчеты выполнялись для структуры модулятора, соответствующей представленной на рис.3.

Отметим, что существенное влияние на работу модулятора оказывают размеры областей легирования дырками и электронами (W_p - и W_n -области), которые примыкают к гребню волновода (рис.3) и отделяют его от сильнолегированных p^{++} - и n^{++} -областей, где будут распола-

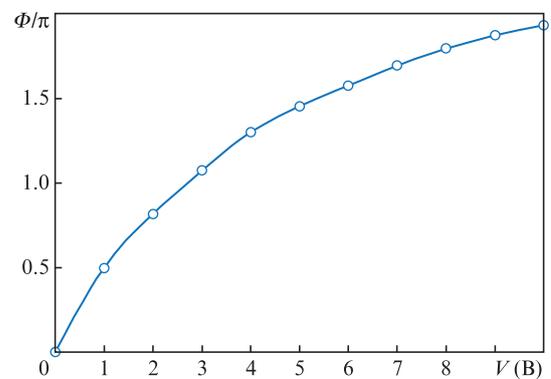


Рис.6. Набег фазы Φ в плече интерферометра Маха–Цендера длиной 5 мм в зависимости от напряжения обратного смещения V , прикладываемого к n^{++} -области электрооптического модулятора на основе вертикального p – n -перехода с однородным легированием. Электрический потенциал в p^{++} -области равен нулю, $N_A = 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 14 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Расчет с использованием оптического пакета от RSoft.

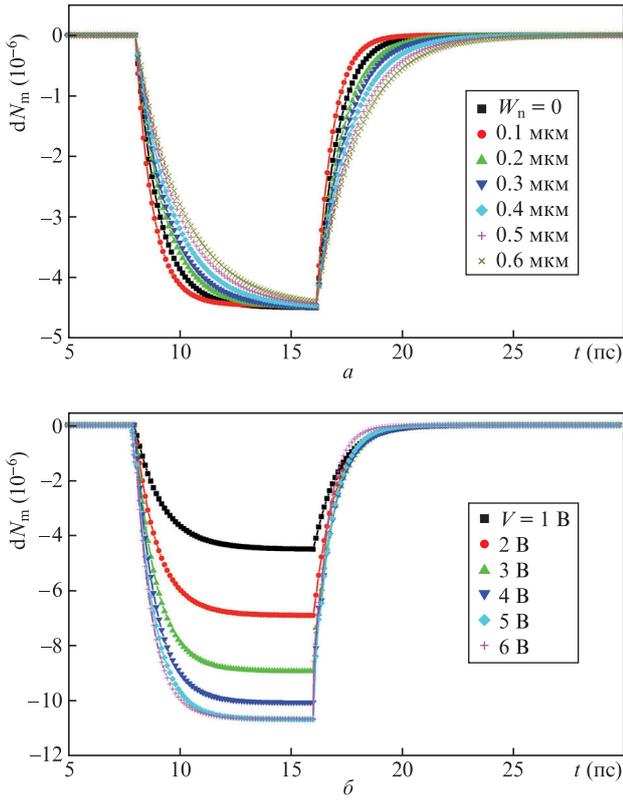


Рис.7. Зависимости от времени эффективного показателя преломления dN_m для фундаментальной моды при воздействии короткого импульса напряжения амплитудой 0.5 В для различных размеров области легирования за границами гребня ($W_n = W_p$) (а) и различных величин обратного смещения V при $W_n = W_p = 0.2$ мкм (б); $N_A = 3 \times 10^{17}$ см $^{-3}$, $N_D = 14 \times 10^{17}$ см $^{-3}$. Расчет с использованием оптического пакета от RSoft.

гаться управляющие электроды. В частности, параметры W_p , W_n , p , n и n_c существенно влияют на частотные характеристики модулятора. Для иллюстрации на рис.7 приведены расчетные зависимости изменения во времени эффективного показателя преломления для фундаментальной моды при воздействии короткого импульса напряжения амплитудой 0.5 В. Например, видно, что время отклика вертикального р-п-перехода уменьшается до 1 пс при уменьшении W_n от 0.6 до 0.2 мкм. Дальнейшее уменьшение W_n и W_p нецелесообразно из-за значительного возрастания оптических потерь при приближении сильнолегированных p^+ - и n^+ -областей к области локализации фундаментальной моды волновода (см. рис.5). Поэтому в дальнейшем мы использовали значение $W_n = W_p = 0.2$ мкм, которое обеспечивает достаточно быстрый отклик р-п-перехода на изменение электрического поля во всем диапазоне изменения напряжения смещения, прикладываемого к этому переходу (рис.7,б). В свою очередь это обуславливает широкую полосу работы р-п-перехода, рассчитанную при малом изменении амплитуды сигнала. Отметим, что частотная зависимость изменения показателя преломления р-п-перехода с хорошей точностью описывается комбинацией функции Гаусса и экспоненциальной функции:

$$M_{pn}(F) = y_0 + A_1 \exp(-(F/t_1)^2) + A_2 \exp(-F/t_2), \quad (1)$$

где F – частота в гигагерцах.

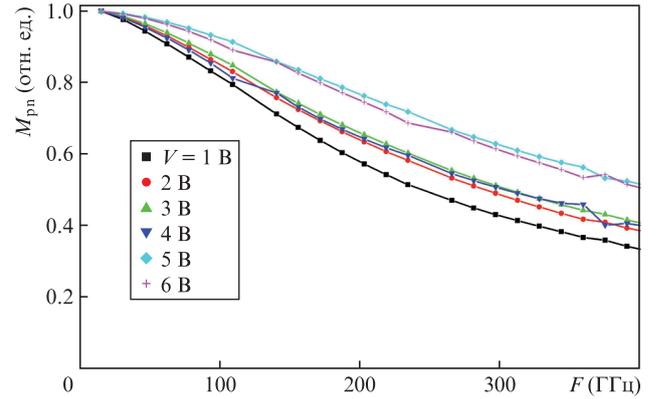


Рис.8. Зависимости относительного изменения показателя преломления р-п-перехода для фундаментальной моды от частоты слабого модулирующего сигнала, приложенного к электроодной структуре р-п-перехода, работающего в режиме обеднения; $N_A = 3 \times 10^{17}$ см $^{-3}$, $N_D = 14 \times 10^{17}$ см $^{-3}$. Расчет с использованием оптического пакета от RSoft.

Подгоночные параметры, найденные по зависимостям, представленным на рис.8, приведены в табл.1. Они позволяют также найти максимальную ширину оптической полосы частот [39] работы р-п-перехода ΔF_{pn} , определяемую из соотношения $M_{pn}(\Delta F_{pn}) = 0.5$.

Табл.1. Параметры аппроксимации частотной характеристики вертикального р-п-перехода.

Параметры	V (В)						
	1	2	3	4	5	6	7
y_0	0.053	0.058	0.0655	0.0722	0.0883	0.101	0.108
A_1	0.374	0.342	0.3127	0.3611	0.2201	0.312	0.362
t_1 (ГГц)	196.0	222.6	229.6	233.1	301.2	294.2	257.4
A_2	0.584	0.614	0.6431	0.5623	0.7341	0.607	0.557
t_2 (ГГц)	524.1	581.3	576.9	652.7	639.6	726.6	725.2
ΔF_{pn} (ГГц)	243	285.3	303.5	297.1	420.4	400	358.3

Мы рассчитали основные параметры электрооптического модулятора (характерную длину $L_{\pi/2}$ и оптические потери $L_{\text{loss}\pi/2}$ (рис.9)), при которых достигается сдвиг фаз $\pi/2$ в случае распространения оптической волны через гребенчатый волновод с р-п-переходом. Они определены по данным расчета действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления для фундаментальной моды и существенно зависят от концентрации легирующих примесей и, особенно, от напряжения смещения.

Как уже отмечалось выше, только на основании оптических расчетов (см. рис.8,9) невозможно сделать вывод об оптимальных конструктивных параметрах ЭО модулятора СВЧ диапазона, т. к. здесь решающую роль играют его СВЧ свойства, в основном затухание и скорость СВЧ волны. В частности результаты, приведенные на рис.9, показывают, что желательно использовать концентрацию доноров $N_D = 3 \times 10^{17}$ см $^{-3}$, т. к. при этом наблюдается минимум оптических потерь и достигается умеренная эффективность управления фазой оптической волны. Однако совместный учет всех факторов (с учетом СВЧ свойств структуры) показал, что субоптимальными параметрами для широкополосного ЭО модулятора являются концентрации акцепторов, $N_A = 3 \times 10^{17}$ см $^{-3}$, и доноров, $N_D =$

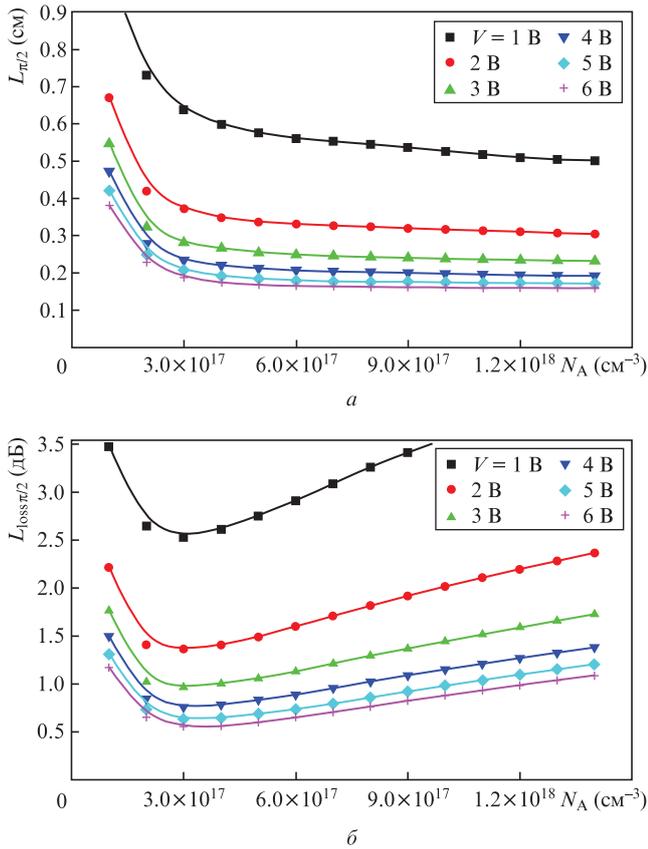


Рис.9. Зависимости от концентрации акцепторов длины (*a*) и оптических потерь (*b*) для обеспечения сдвига фаз $\pi/2$ при различных величинах обратного смещения на р–п-переходе, работающем в режиме обеднения; $N_A = 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $N_D = 14 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Расчет с использованием оптического пакета от RSoft.

$14 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Такая концентрация доноров обусловлена необходимостью снизить величину омического сопротивления области n-типа, прилегающей к р–п-переходу, без чего невозможно обеспечить достаточно широкую полосу СВЧ модуляции.

5. СВЧ свойства вертикального р–п-перехода

Для моделирования СВЧ свойств активной части модулятора, где происходит модуляция световой волны СВЧ волной, использовался специализированный пакет СВЧ программ [36]. Ширины электродов модулятора варьировались для достижения величины импеданса СВЧ тракта копланарной линии, близкой к 50 Ом при рабочем напряжении, а также для уменьшения потерь при распространении СВЧ волны. Расстояние между центрами двух оптических волноводов на подложке из кремния выбрано равным 8 мкм, что соответствует параметрам оптической схемы интерферометра Маха–Цандера (см. рис.1).

Как следует из результатов исследования кремниевых модуляторов, описанных в литературе, импеданс копланарной линии модулятора обычно составляет 25–35 Ом. Поэтому необходимо, чтобы два плеча кремниевого модулятора управлялись таким образом, чтобы ток в них протекал последовательно. Такое последовательное соединение р–п-переходов модулятора существенно облегчает задачу получения импеданса копланарной линии СВЧ волны в 50 Ом. При этом фазосдвигающие элементы ра-

ботаю в режиме push–pull, при котором эффективно используются оба плеча интерферометра Маха–Цандера, т. к. в них происходит изменение фазы оптического сигнала в противоположных направлениях, что уменьшает длину модулятора в два раза.

При СВЧ расчете учитывалось, что толщина зоны обеднения зависит от концентрации легирующей примеси и величины обратного напряжения смещения. В частности, для $N_A = 3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $N_D = 14 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при подаче обратного смещения $V = 4 \text{ В}$ общая толщина зоны обеднения (истощения) в р–п-переходе составит $\sim 0.18 \text{ мкм}$, из которых 0.15 мкм соответствует области дырок, а 0.03 мкм – области электронов.

Численное моделирование распространения квази-ТЕМ СВЧ волны в электродной структуре с р–п-переходами показывает, что ее свойства зависят от величины обратного смещения, которое влияет на размер области обеднения и, следовательно, на емкость р–п-перехода. В частности, при обратном смещении 5 В можно получить величину импеданса, близкую к 50 Ом, что важно для согласования с 50-омной внешней цепью. Кроме того, для описания работы ЭО модулятора очень важны затухание СВЧ волны и эффективный показатель ее преломления, которые определяют полосу его рабочих частот [3]. Влияние этих факторов описывается следующим выражением:

$$M_{\text{RF}}(F) = \exp(-\alpha_N L/2) \times \left[\frac{\sinh^2(\alpha_N L/2) + \sin^2(\xi L/2)}{(\alpha_N L/2)^2 + (\xi L/2)^2} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где L – длина активной части модулятора; $\xi = 2\pi F \times (N_{\text{RF}} - N_{\text{m}})/c_0$; c_0 – скорость света в вакууме; N_{RF} и N_{m} – эффективные показатели преломления для СВЧ волны и для фундаментальной моды оптической волны; F – частота СВЧ волны; $\alpha_N = \alpha/(20 \log e)$; α – затухание СВЧ волны (в дБ/см). Общая частотная характеристика ЭО модулятора будет определяться произведением факторов, обусловленных р–п-переходом (1) и СВЧ волной (2):

$$M(F) = M_{\text{pn}}(F)M_{\text{RF}}(F). \quad (3)$$

Используя данные СВЧ расчета и выражение (3), мы нашли основные вклады, определяющие ширину СВЧ полосы для ЭО модулятора бегущей волны, а также ряд других важнейших параметров (табл.2). При этом рассматривалась оптическая полоса частот (ΔF), которая соответствует критерию $M(\Delta F) = 0.5$. Интересно отметить, что для длинных ЭО модуляторов, которые могут работать при частотах, не превышающих 20 ГГц, основным ограничивающим полосу частот фактором является затухание СВЧ волны. Для более коротких и, следовательно, более высокочастотных модуляторов главным ограничивающим фактором обусловлен рассогласованием скоростей оптической и СВЧ волн. Отметим, что для нашей конструкции модулятора переходные процессы в р–п-переходе незначительно ограничивают полосу частот. При этом, если известны характерные полосы частот для СВЧ вклада (ΔF_{RF}) и вклада от р–п-перехода (ΔF_{pn}), результирующую полосу можно найти из эмпирического соотношения, получаемого из численного анализа выражений (1)–(3):

$$(1/\Delta F)^{1.6} = (1/\Delta F_{\text{RF}})^{1.6} + (1/\Delta F_{\text{pn}})^{1.6}. \quad (4)$$

Табл.2. СВЧ параметры электрооптического модулятора на вертикальных р-п-переходах при обратном смещении -5 В. Ширина электрода 12 мкм, обеспечивающая импеданс 50 Ом при таком смещении.

V_{max} (В)	dV (В)	L (см)	L_{RF} (дБ)	N_{RF}	ΔF_{RF} (ГГц)	ΔF_{NRF} (ГГц)	ΔF_{loss} (ГГц)	ΔF_{pn} (ГГц)	ΔF_{tot} (ГГц)	Z (Ом)	L_{opt} (дБ)	$V_{\pi}L$ (В·см)
1	1	0.501	10.7	5.499	11.6	14.8	20.1	243.0	11.5	39.7	4.07	1.001
2	2	0.305	22.8	4.942	22.3	33.0	33.8	285.3	22.1	43.4	2.37	1.222
3	3	0.232	35.1	4.617	32.4	56.8	44.4	303.5	31.8	46.0	1.73	1.392
4	4	0.192	47.5	4.365	42.4	105.7	54.6	297.1	41.2	48.4	1.38	1.538
5	5	0.172	57.2	4.186	50.8	160.0	62.2	420.4	49.7	50.3	1.20	1.719
6	6	0.159	65.3	4.048	58.3	223.3	68.8	400.0	56.7	51.9	1.09	1.904
7	7	0.148	74.2	3.912	66.2	339.9	75.4	358.3	63.5	53.6	0.99	2.065
5	3	0.393	18.73	4.2935	25.55	37.52	37.85	420.4	25.37	49.43	2.83	2.36
6	3	0.501	13.89	4.2016	22.24	30.888	34.06	400	22.11	50.69	3.51	3.008

Примечание: V_{max} и dV – максимальное значение (при котором анализируются СВЧ свойства) и амплитуда изменения управляющего напряжения; L – длина активной части модулятора, работающего в двухтактном режиме; L_{loss} – потери СВЧ волны; N_{RF} – эффективный показатель преломления СВЧ волны; ΔF_{RF} – общий вклад СВЧ волны в ширину оптической полосы ЭО модулятора; ΔF_{NRF} – вклад в ширину полосы модулятора, обусловленный рассогласованием скоростей оптической и СВЧ волн; ΔF_{loss} – вклад в ширину полосы модулятора из-за потерь СВЧ волны; ΔF_{pn} – вклад в ширину полосы модулятора из-за времени перестройки заряда в области р-п-перехода; ΔF_{tot} – результирующая полоса частот модулятора; Z – волновой импеданс на максимальной частоте; L_{opt} – внутренние оптические потери из-за наличия р-п-перехода; $V_{\pi}L$ – произведение полуволнового напряжения на длину активной части модулятора.

Табл.3. СВЧ параметры модифицированного варианта электрооптического модулятора на вертикальных р-п-переходах при обратном смещении -3 В. Ширина электрода 12 мкм, обеспечивающая импеданс 50 Ом при таком смещении.

V_{max} (В)	dV (В)	L (см)	L_{RF} (дБ)	N_{RF}	ΔF_{RF} (ГГц)	ΔF_{NRF} (ГГц)	ΔF_{loss} (ГГц)	ΔF_{pn} (ГГц)	ΔF_{tot} (ГГц)	Z (Ом)	L_{opt} (дБ)	$V_{\pi}L$ (В·см)
1	1	0.553	8.8	5.664	10.1	12.9	20.8	251.0	10.1	42.5	3.33	1.105
2	2	0.331	19.4	5.054	20.1	28.2	32.0	287.0	19.9	46.7	1.88	1.324
3	3	0.249	31.0	4.687	29.9	48.1	42.0	307.0	29.5	49.9	1.34	1.492
4	4	0.207	41.9	4.440	38.9	78.2	51.3	322.0	38.1	52.5	1.07	1.660
5	5	0.183	52.3	4.228	47.4	140.5	59.2	414.0	46.5	54.9	0.91	1.831
6	6	0.168	60.8	4.081	54.4	225.1	65.0	439.0	53.3	56.8	0.81	2.016
7	7	0.157	68.98	3.9489	61.28	363.96	70.52	438	59.69	58.68	0.74	2.193
4	3	0.332	21.77	4.4995	26.18	39.224	39.05	322	25.89	51.93	1.79	1.993

Примечание: Обозначения те же, что и в табл.2.

Важно отметить, что данный тип электрооптического модулятора обладает хорошими функциональными характеристиками. В частности, при напряжении 5 В модулятор длиной 0.17 см будет иметь оптическую полосу частот шириной ~ 50 ГГц. За счет увеличения длины активной части модулятора L можно уменьшить управляющее напряжение, но при этом одновременно уменьшаются рабочая полоса частот, а также волновое сопротивление.

В принципе, приложение напряжения смещения (см. две нижние строки в табл.2) позволяет обеспечить волновое сопротивление, близкое к 50 Ом, однако при этом значительно ухудшается модуляционная эффективность (см. значение $V_{\pi}L$) и уменьшается полоса частот. В то же время, если немного изменить технологию изготовления и уменьшить до уровня $N_D = 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ степень легирования верхней части гребня (n_c на рис.3), область обеднения в окрестности гребня волновода расширится, что снизит общую емкость р-п-перехода и обеспечит условие достижения волнового сопротивления 50 Ом при более низком напряжении (3 В). Результаты расчетов для модифицированного варианта ЭО модулятора приведены в табл.3. Видно, что такой 50-омный трехвольтовый модулятор длиной 0.25 см уже будет иметь рабочую полосу частот шириной ~ 30 ГГц, а также значительно большую эффективность управления ($V_{\pi}L = 1.5 \text{ В} \cdot \text{см}$). Более того, возможно создание модуляторов с рабочим напряжением 1 и 2 В и, следовательно, с умеренными полосами частот (10 и 20 ГГц, см. табл.3).

Таким образом, при конструировании ЭО модулятора на обратных р-п-переходах на кремнии необходимо системным образом учитывать оптические и СВЧ свойства его структуры. Причем конструктивные параметры модулятора кардинальным образом зависят от предполагаемой для использования рабочей полосы частот и управляющего напряжения. При этих условиях путем оптимизации параметров структуры можно добиться того, что модулятор на вертикальных р-п-переходах даже для оптического пучка большой апертуры (предназначен для пропуска излучения большой мощности) будет иметь технические параметры, сопоставимые с параметрами лучших ЭО модуляторов альтернативных конструкций [18–24]. В частности, такой модулятор для рабочей полосы частот 50 ГГц при управляющем напряжении 5 В будет иметь общую длину 7 мм и внутренние потери ~ 4 дБ, которые складываются из потерь на элементах ММИ 1×2 и 2×2 (~ 0.3 дБ), потерь в активной части модулятора (~ 1.2 дБ при напряжении смещения 5 В) и потерь на несовершенствах границ волновода (~ 2.1 дБ = 0.7 см \times 3 дБ/см).

6. Заключение

В ходе проведенного численного анализа определены субоптимальные параметры для формирования структуры вертикального р-п-перехода в гребенчатом оптическом волноводе на кремнии. Они обеспечивают создание

компактного электрооптического модулятора бегущей волны (общая длина 7 мм) с рабочим напряжением ~ 5 В (для двухтактного режима работы) с длиной активных электродов 1.7 мм и внутренними потерями менее 4 дБ (для напряжения смещения 5 В). Модулятор согласован с 50-омным СВЧ трактом на частоте 50 ГГц и в нем используется оптическая схема интерферометра Маха–Цендера с применением элементов ММИ 1×2 и 2×2 , обеспечивающих рабочую точку без дополнительного напряжения смещения. Модифицированный 50-омный модулятор с измененным профилем легирования донорами может работать в полосе частот 30 ГГц при управляющем напряжении 3 В.

Показано, что в ходе решения задачи оптимизации параметров ЭО модулятора на кремнии необходимо исходить из требуемых полосы частот и рабочего напряжения, а в процессе соответствующего численного анализа системным образом учитывать оптические и СВЧ свойства его полупроводниковой и электродной структур. Результаты исследований могут использоваться при разработке электрооптических модуляторов и оптоэлектронных элементов для оптической связи, радиофотоники, а также систем обработки и передачи данных.

Авторы благодарят компанию Synopsys, Inc. [33] за предоставление лицензионного программного обеспечения от RSoft для компьютерного моделирования наших структур. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI58117X0026.

- Kaminow I. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **23**, 57 (1975).
- Chen A., Murphy E.J. *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications* (Boca Raton: CRC Press, 2011).
- Wooten E.L. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6** (1), 69 (2000).
- Liu J. et al. *RSC Advances*, **5**, 15784 (2015).
- Zhang X. et al. *J. Lightwave Technol.*, **34**, 2941 (2016).
- Lauermann M. et al. *J. Lightwave Technol.*, **33**, 1210 (2015).
- Leuthold J. et al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 114 (2013).
- Li B., Vemagiri J., Dinu R. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 606 (2009).
- Abedi K., Vahidi H. *Frontiers Optoelectron.*, **6**, 290 (2013).
- Wang L.D. et al. *Appl. Phys. A*, **122**, 1 (2016).
- Takahashi S. et al. *J. Lightwave Technol.*, **27**, 1045 (2009).
- Денисюк И.Ю., Бурункова Ю.Э., Позднякова С.А., Баля В.К., Жук Д.И., Фокина М.И. *Оптика и спектроскопия*, **119**, 691 (2015).
- Микерин Л., Плеханов А.И., Симанчук А.Э., Якиманский А.В., Мартыненко А.А., Валишева Н.А. *Автометрия*, **54**, 78 (2018).
- Tsarev A., Taziev R., Heller E., Chalony M. *Photon. Nanostruct. Fundament. Applicat.*, **25**, 31 (2017).
- Juodawlkis P.W., O'Donnell F.J., Bailey R.J., Plant J.J., Ray K.G., Oakley D.C., Napoleone A., Watts M.R., Betts G.E. *Proc. SPIE*, **5435**, 0277 (2004).
- Mitchell P., Longone R., Janssen A., Garrett B., Luo J.K.J. *Optoelectr. Advanc. Mater.*, **12**, 965 (2010).
- Царев А.В., Тазиев Р.М. *Квантовая электроника*, **49**, 266 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 266 (2019)].
- Soref R. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **12**, 1687 (2006).
- Jalali B., Fathpour S. *J. Lightwave Technol.*, **24**, 4600 (2006).
- Reed G.T. *Silicon Photonics – the State of the Art* (New York: John Wiley & Sons Ltd, 2008).
- Wang J. *CMOS-Compatible Key Engineering Devices for High-Speed Silicon-Based Optical Interconnections* (New York: Springer, 2019).
- Witzens J. *Proc. IEEE*, **106**, 2158 (2018).
- Pinguet T. et al. *Proc. IEEE*, **106**, 2281 (2018).
- Reed G.T., Mashanovich G., Gardes F.Y., Thomson D.J. *Nat. Photon.*, **4**, 518 (2010).
- Green W.M.J., Rooks M.J., Sekaric L., Vlasov Y.A. *Opt. Express*, **15**, 17106 (2007).
- Soref R., Bennett B. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 123 (1987).
- Liu A., Liao L., Rubin D., Nguyen H., Ciftcioglu B., Chetrit Y., Izhaky N., Paniccia M. *Opt. Express*, **15**, 660 (2007).
- Feng N.N., Liao S., Feng D.Z., Dong P., Zheng D., Liang H., Shafiiha R., Li G., Cunningham J.E., Krishnamoorthy A.V., Asghari M. *Opt. Express*, **18**, 7994 (2010).
- Tu X.G., Liow T.Y., Song J.F., Yu M.B., Lo G.Q. *Opt. Express*, **19**, 18029 (2011).
- Gardes F.Y., Thomson D.J., Emerson N.G., Reed G.T. *Opt. Express*, **19**, 11804 (2011).
- Thomson D.J., Gardes F.Y., Liu S., Porte H., Zimmermann L., Fedeli J.M., Hu Y., Nedeljkovic M., Yang X., Petropoulos P., Mashanovich G.Z. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19**, 85 (2013).
- Reed G.T., Mashanovich G.Z., Gardes F.Y., Nedeljkovic M., Hu Y., Thomson D.J., Hsu S.S. *Nanophotonics*, **3**, 229 (2014).
- Liow T.-Y., Song J., Tu X., Lim A.E.-J., Fang Q., Duan N., Yu M., Lo G.-Q. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **19** (2013).
- <https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft.html>, single license (2018).
- <https://www.cst.com/products/cstmws>, single license (2017).
- <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>, single license (2018).
- Tsang H.K., Liu Y. *Semicond. Sci. Technol.*, **23**, 064007 (2008).
- Tsarev A.V., Taziev R.M. *Proc. 14th Intern. Sci. Techn. Conf. (APEIE)* (Novosibirsk, 2018, Vol 1/2, p.306).
- Ghione G. *Semiconductor Devices for High-Speed Optoelectronics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2009).