БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Чесноков В. В. Интерференционные светофильтры с перестраиваемой полосой пропускания / В. В. Чесноков, [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 63–68.
2. Никулин, Д.М. Термостабильность перестраиваемых светофильтров на основе резонатора Фабри-Перо / Д.М. Никулин // ГЕО-СИБИРЬ. – 2007. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 167–170.
3. Шамин, А. А. Получение и исследование прозрачного проводящего покрытия на стеклянных подложках / А. А. Шамин, Е. А. Печерская. // Молодой ученый. – 2017. – Т. 138. – № 4. – С. 71–74.
4. Материалы тонкослойной оптики для термооптических преобразователей ИК-диапазона / Кузьмицкая А. С. [и др.] // Молодежь в науке – 2023 : тезисы докладов XX Международной научной конференции молодых ученых, Минск, 20–22 сентября 2023 г. – Минск : Беларуская навука, 2023. –С. 524–526.
5. ЗАО НПФ "Люминофор". Сайт производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://luminophor.ru/. – Дата доступа: 01.08.2024.
6. Иванов, А. Электронно-лучевое напыление: технология и оборудование / А. Иванов, Б. Смирнов // НаноИндустрия. – 2012. – Т. 6. – № 36. – С. 28–34.
7. ЭссентОптикс. Сайт производителя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.essentoptics.com/. – Дата доступа: 30.05.2024.
8. Перспективы применения микрорезонаторов Фабри-Перо для тепловизионной техники / Кузьмицкая А. С. [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т. 66, № 3. – С. 280–286.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВОГО ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ФАЗОВРАЩАТЕЛЯ НА ЭФФЕКТЕ ОБЕДНЕНИЯ СВОБОДНЫХ НОСИТЕЛЕЙ

Е. А. Лаврухина, А. И. Бобров, А. В. Нежданов, К. В. Сидоренко, Д. В. Хомицкий

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, пр. Гагарина, 23, 603022, Нижний Новгород, Россия, e-mail: ekaterina.a.lavrukhina@gmail.com

В работе проведена оптимизация геометрических размеров электрооптического высокоскоростного фазовращателя для достижения наилучшей эффективности модуляции сигнала. Исследуемая структура представляет собой высоколегированный кремниевый волновод, работающий на механизме обеднения носителей заряда и интегрированный в планарный интерферометр Маха-Цендера. Управление фазовым сдвигом происходит за счёт изменения концентрации носителей заряда при подаче обратного напряжения смещения и последующего изменения показателя преломления материала волновода. Численно были найдены зависимости оптических потерь и изменение реальной части показателя преломления для нескольких оптических мод от ширины кремниевого волновода и приложенного напряжения. В результате π-фазовый сдвиг при напряжении 4 В удалось получить для фазовращателя с длиной 4,5 мм.

Key words: оптоэлектроника; кремниевые фазовращатели; интегральные электрооптические устройства; интерферометр Маха-Цендера; эффект дисперсии плазмы свободных носителей.

GEOMETRICAL PARAMETERS OPTIMIZATION OF SILICON ELECTRO–OPTICAL PHASE SHIFTERS BASED ON FREE–CARRIER–DEPLETION

E. A. Lavrukhina, A. I. Bobrov, A. V. Nezhdanov, K. V. Sidorenko, D. V. Khomitsky

National Research Lobachevsky State University, Gagarin av. 23, 603022 Nizhny Novgorod, Russia
Corresponding author: A. I. Bobrov (bobrov@phys.unn.ru)

Geometrical parameters of high-speed phase shifters are optimized in this paper to improve their efficiency. The studied structure is a silicon waveguide with wide highly doped ribs, operating on the charge carrier depletion mechanism and integrated into a planar Mach-Zehnder interferometer. The phase shift is controlled by changing the charge carrier concentration when applying a reverse bias voltage, which lead to changing of the waveguide refractive index. The paper presents numerical results of optical loss, the real part of the change in the refractive index for several optical modes depending on the width of the silicon waveguide and the applied voltage. As a result, for a phase shifter with a 4.5 mm length and 4 V, it was possible to obtain a π-phase shift.

Key words: optoelectronics; silicon phase-shifters; integrated electro-optical devices; Mach-Zehnder interferometer; free-carrier plasma dispersion effect.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевый фазовращатель контактного типа, работающий на механизме обеднения свободных носителей, является одним из широко используемых благодаря простоте изготовления и совместимости с высокоскоростным режимом работы в диапазоне нескольких десятков гигагерц. Однако по эффективности модуляции, он сильно уступает фазовращателям на эффекте инжекции/накоплении носителей [1]. Для улучшения оптических характеристик был разработан ряд методов. Один из них заключается в разумном распределении максимальной и минимальной концентрации носителей заряда вдоль ребра волновода [2]. Известно, что чем больше концентрация носителей заряда в волноводе, тем эффективнее будет изменяться показатель преломления под действием обратного напряжения смещения. Однако высокая концентрация заряда в области оптической моды сигнала, распространяемого по оптоволокну, способствует увеличению погонной ёмкости, что негативно отразится на ширине полосы пропускания. Поэтому сильно легированные области следует располагать на рёбрах волновода, где скапливается большое количество носителей свободных зарядов в результате их перераспределения под действием напряжения смещения. В свою очередь, область со слабым легированием должна находится в сердцевине кремниевого волновода. Тогда в результате эффекта обеднения носителей снизится погонная ёмкость волновода.

Ещё одним методом для улучшения оптических характеристик, является оптимизация геометрических параметров фазовращателя. Избегание перекрытий моды волновода с областью легирования хорошо сказывается на снижение оптических потерь, но ухудшает эффективность модуляции. Попытка выдержать баланс между тремя важнейшими показателями работы модулятора [3]: эффективностью фазового сдвига, вносимыми потерями и полосой пропускания, мотивирует исследователей разрабатывать различные схемы фазовращателей, работающих на основе обеднения носи-

телей. К таким схемам относят следующие известные конфигурации фазовращателей, которые направлены на улучшение оптических характеристик: 1) *p–n*-переход в центре волновода [2]; 2) смещённый *p–n*-переход [4]; 3) *p–i–p–i–n* -переход [5]; 4) *L*-образное [6] или *U*-образное [7] соединение *p–n*-перехода; 5) волновод с собственными областями в углах сердечника [8]; 6) волновод с чередующейся *p–n*-структурой [9]; 7) зигзагообразный волновод [10] и др.

В данной работе проведена оптимизация геометрических размеров электрооптического высокоскоростного фазовращателя на базе высоколегированного *p–n*-перехода для достижения высокой эффективности модуляции сигнала. Для наилучшей конфигурации были рассчитаны оптические потери и изменение показателя преломления для нескольких оптических мод от приложенного обратного напряжения смещения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Численное моделирование проводилось в программном комплексе ANSYS Lumerical. В модуле CHARGE было получено распределение свободных носителей заряда в поперечной структуре волновода в зависимости от обратного напряжения смещения. В ходе оптимизации параметров волновода, а также при расчёте оптических мод, изменения показателя преломления и потерь сигнала на длине волны $\lambda = 1550$ нм в зависимости от ширины волновода и напряжения, использовался модуль MODE.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера оптимизации геометрического размера фазового модулятора, была выбрана конфигурация поперечного сечения оптического ребристого высоколегированного кремниевого волновода, представленного на рис. 1. Параметр *d*, отвечающий за ширину волновода, варьируется в ходе моделирования оптических характеристик. Значения концентраций свободных носителей в p и n областях выбраны на уровне 5×10^{17} см$^{-3}$ и 3×10^{17} см$^{-3}$, соответственно. В промежуточных p^+ и n^+ областях легирования, концентрации достигают значений 2×10^{18} см$^{-3}$. В областях, где структура прилегает к управляющим электродам, для уменьшения сопротивления и сохранения низких омических потерь, были добавлены области p^{++} и n^{++} с повышенной концентрацией равной 2×10^{20} см$^{-3}$.

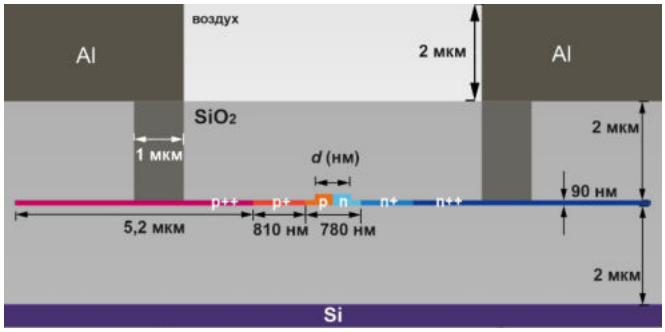

Рис. 1. Схема поперечного сечения фазовращателя без выдержки масштаба

Для определения оптимального диапазона значений ширины сердечника d, при котором можно считать, что волновод работает в «одномодовом» режиме для длины телекоммуникационной волны $\lambda = 1550$ нм, были проанализированы графики реальной части эффективного показателя преломления (n_{eff}) для первых четырёх мод волновода, которые представлены на рис. 2, *а*.

Из рис. 2, *а* видно, что с уменьшением ширины волновода d, эффективные показатели преломления соседних мод сближаются. Таким образом, к основной моде будут подмешиваться соседние оптические моды, что приведёт к ухудшению работы интерферометра и увеличению потерь модулируемого сигнала. На рис. 2, *б* приводятся зависимости потерь данных мод от ширины d, согласно которой мы можем убедиться, что основная мода сигнала характеризуется наименьшими оптическими потерями.

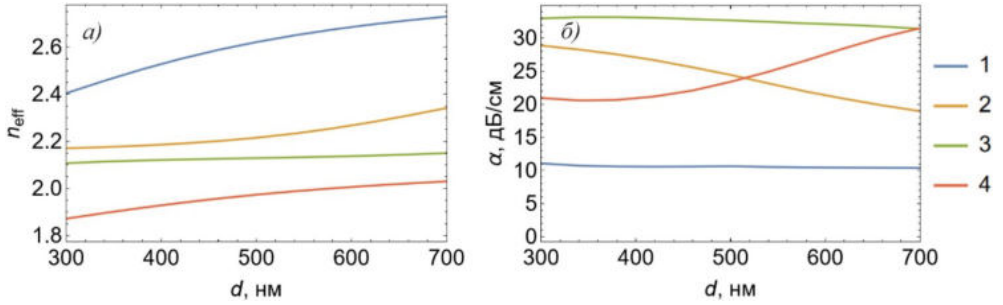

Рис. 2. *а* – Эффективный показатель преломления, *б* – оптические потери, построенные для первых четырёх мод волновода при различных ширинах волновода d и нулевом напряжении смещения для длины волны $\lambda = 1550$ нм. Синяя кривая отвечает первой оптической моде, жёлтая – второй, зелёная – третьей, красная – четвёртой

График оптических потерь для первой моды от ширины волновода изображён на рис. 3. На нем отмечены четыре выбранные точки, для каждой из которых построено распределение напряжённости электрического поля (TE) по сечению волновода.

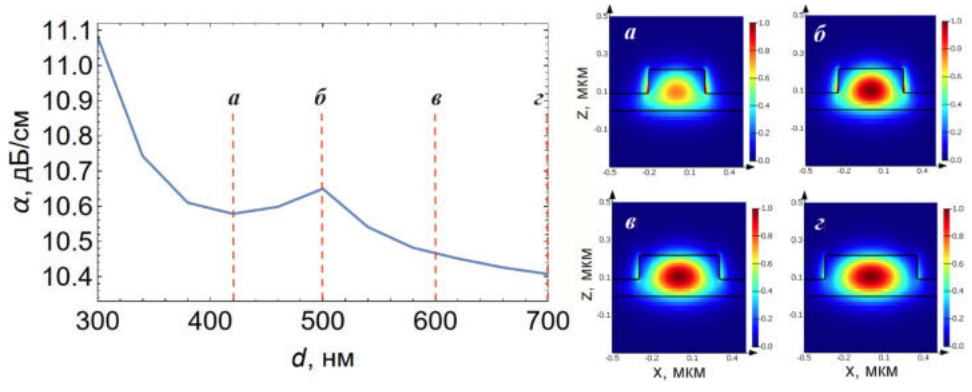

Рис. 3. График оптических потерь для первой моды от ширины волновода d при нулевом напряжении смещения. Буквами обозначены значения d, равные 420 нм, 500 нм, 600 нм, 700 нм, для каждого из которых построен профиль напряжённости электрического поля основной моды (TE) в сечении волновода фазовращателя для длины волны $\lambda = 1550$ нм

Из рис. 3 видно, что мода хорошо ограничена внутри волновода при ширине $d > 500$ нм и, таким образом, значительно перекрывается с распределением свободных носителей, что может заметным образом повлиять на изменение эффективного показателя преломления под действием напряжения обратного смещения.

На рис. 4, *а* представлено изменение действительной части эффективного показателя преломления (Δn_{eff}) от приложенного напряжения (V). Откуда видно, что с увеличением ширины волновода d, изменение показателя преломления уменьшается. Результаты показывают, чем выше значение обратного напряжения смещения, тем больше изменение показателя преломления и меньше оптические потери, что ожидаемо, поскольку при большем напряжении область волновода обедняется сильнее.

На рис. 4, *б* построена эффективность модуляции ($V_\pi L_\pi$) фазовращателя в зависимости от напряжения. Более высокое значение напряжения приводит к уменьшению требуемой длины фазовращателя для достижения изменения фазы на π. Можно сделать вывод, чем шире волновод, тем хуже оптические характеристики фазовращателя.

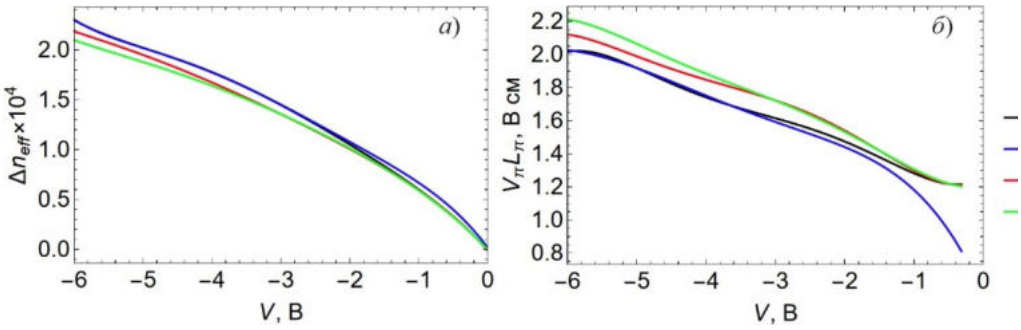

Рис. 4. а – Изменение эффективного показателя преломления;
б – зависимость эффективности фазовращателя на длине волны λ = 1550 нм
от обратного напряжения смещения для четырёх различных размеров волновода d

Из рис. 2–4 можно сделать вывод, что в оптимальный диапазон ширины волновода d попадают исследуемые значения $d = 420$ нм и $d = 500$ нм. Таким образом, чтобы получить π-фазовый сдвиг при ширине волновода, соответствующей значению $d = 500$ нм, и при напряжении 4 В, достаточно длины фазовращателя равной 4.5 мм.

На рис. 5 показана зависимость сбалансированной эффективности фазовращателя ($\alpha V_\pi L_\pi$) от напряжения, учитывающая одновременно и эффективность, и потери, построенная для четырёх исследуемых ширин волновода.

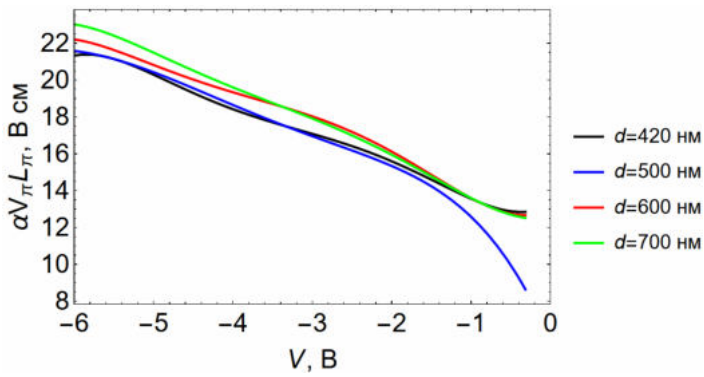

Рис. 5. Зависимость сбалансированной эффективности фазовращателя от напряжения, построенная для четырёх исследуемых размеров волновода d

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена оптимизация геометрических размеров высоколегированного кремниевого фазовращателя, работающего на механизме обеднения свободных носителей. Были найдены оптимальная конфигурация оптического волновода, при которой наблюдается максимальное изменение показателя преломления и минимальные оптические потери. Для ширины оптического волновода $d = 500$ нм, можно ожидать, что эффективность модуляции будет соответствовать 1.75 В см при напряжении 4 В, с соответствующими оптическими потерями 10.65 дБ/см и с полосой пропускания до 36 ГГц. Выяснилось, что в рамках выбранной конфигурации волновода для реализации π-фазового сдвига достаточно длины фазовращателя равного 4.5 мм. Данные результаты хорошо верифицируются с экспериментальными работами [2, 11].

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 1 «Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров. Этап 2023–2025».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Taking silicon photonics modulators to a higher performance level: state-of-the-art and a review of new technologies / A. Rahim [et al.] // Advanced Photonics. – 2021. – Vol. 3. №. 2. – P. 024003–024003.
2. High-speed silicon modulator with slow-wave electrodes and fully independent differential drive / R. Ding [et al.] // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32. №. 12. – P. 2240–2247.
3. High-speed silicon photonics modulators / J. Witzens // Proceedings of the IEEE. – 2018. – Vol. 106. №. 12. – P. 2158–2182.
4. High-speed compact silicon photonic Michelson interferometric modulator / D. Patel [et al.] // Optics express. – 2014. – Vol. 22. №. 22. – P. 26788–26802.
5. 40 Gbit/s low-loss silicon optical modulator based on a PIPIN diode / M. Ziebell [et al.] // Optics express. – 2012. – Vol. 20. №. 10. – P. 10591–10596.
6. A comparative simulation study on lateral and L-shaped PN junction phase shifters for single-drive 50 Gbps lumped Mach–Zehnder modulators / Y. Kim [et al.] // Japanese Journal of Applied Physics. – 2021. – Vol. 60. №. 5. – P. 052002.
7. U-shaped PN junctions for efficient silicon Mach-Zehnder and microring modulators in the O-band / Z. Yong [et al.] // Optics express. – 2017. – Vol. 25. №. 7. – P. 8425–8439.
8. 50-Gb/s silicon optical modulator with traveling-wave electrodes / X. Tu [et al.] // Optics express. – 2013. – Vol. 21. №. 10. – P. 12776–12782.
9. Low loss 40 Gbit/s silicon modulator based on interleaved junctions and fabricated on 300 mm SOI wafers / D. Marris-Morini [et al.] // Optics express. – 2013. – Vol. 21. – №. 19. – P. 22471–22475.
10. High-speed silicon microring modulator based on zigzag PN junction / X. Xiao [et al.] // IEEE Photonics Conference 2012. – IEEE, 2012. – P. 256–257.
11. Low power 50 Gb/s silicon traveling wave Mach-Zehnder modulator near 1300 nm / M. Streshinsky [et al.] // Optics express. – 2013. – Vol. 21. – № 25. – P. 30350–30357.