

Моделирование интегрального фазового модулятора с фазовращателем на основе *u*-образного *pn*-перехода.

М.Э. Макаров^{1,2}, А.Г. Итальянцев¹, М.Ю. Барабаненков^{1,2}

¹АО «НИИМЭ»

²Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН

Аннотация: В работе представлены результаты численного моделирования функционирования модулятора Маха-Цендера с фазовращателем на основе *u*-образного кремниевых *pn*-перехода. Работа устройства основана на эффекте дисперсии плазмы свободных носителей в кремнии. Показана возможность достижения рабочих частот порядка 20 ГГц.

Ключевые слова: радиофотоника, электрооптический модулятор, модулятора Маха-Цендера, планарный волновод.

1. Введение

Развитие интегральной оптоэлектроники связано как с новыми направлениями микроэлектроники [1], так и с возросшим спросом на оптоэлектронные компоненты в различных прикладных задачах. Так, например, непрерывное увеличение объёма данных обуславливает постоянный рост трафика через дата-центры. Это сопровождается распространением параллельных вычислений, использующих несколько серверов одновременно, и повышает требования к скорости передачи данных между ними. Использование оптических коммуникаций позволяет значительно увеличить скорость обмена информацией. Разработка оптических межсоединений является одним из направлений кремниевой микрофотоники. Ключевым компонентом межсоединений являются высокоскоростные электрооптические модуляторы.

В данной работе рассмотрен модулятор на основе интерферометра Маха-Цендера, выполненного в верхнем слое Si структуры Кремний – На – Изоляторе (КНИ) в виде полосковых Si волноводов и фазовращателя с *u*-образной формой *pn*-перехода. В основе его работы лежит эффект дисперсии плазмы, вызывающий изменение показателя преломления Si [2].

Ключевыми параметрами Si модуляторов на основе интерферометра Маха-Цендера являются рабочая частота f_w , глубина модуляции и произведение $L_\pi = V_\pi L$ длины фазовращателя L на напряжение V_π , необходимое для сдвига фазы на π радиан. Величины указанных параметров широко изменяются в зависимости от устройства фазовращателя. В исследованной структуре комбинируются вертикальный и горизонтальный *pn*-переходы. Это позволяет увеличить перекрытие волноводной моды с областью распределения пространственного заряда и увеличить глубину модуляции, что в свою очередь приводит к уменьшению длины прибора и величины приложенного напряжения.

2. Устройство электрооптического модулятора

На рис.1(а) приведена схема электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера. Модулятор состоит из полосковых Y-образных разветвителя и сумматора. В одно (или в оба) плеча интерферометра встраивается фазовращатель, управляемый внешним СВЧ сигналом. Оптическая мода волновода разделяется по интенсивности между плечами интерферометра, сдвигается по фазе в фазовращателе и объединяется в сумматоре. Конструктивная или деструктивная

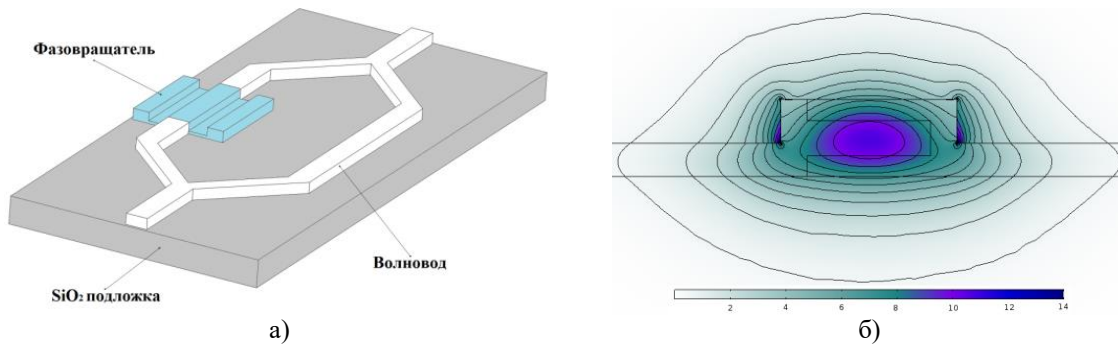


Рисунок 1. а) Схематическое изображение электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера б) Распределение поля волноводной моды в поперечном сечении фазовращателя.

интерференция двух сигналов на выходе сумматора достигается при помощи фазовращателя, который представляет собой диод, область pn -перехода которого совмещается с волноводом. Контактные высоколегированные области диода соединены с областью pn -перехода более тонкими и менее легированными участками, что позволяет рассматривать диод как незначительную неоднородность, не приводящую к существенным потерям энергии волноводной моды (Рис. 1(б)). Модуляция оптического сигнала происходит при подаче на диод обратного смещения, увеличения области пространственного заряда pn -перехода, что обуславливает локальное изменение эффективного (учет подлежащего слоя SiO_2) показателя преломления Si .

На рис. 2 приведено схематическое изображение распределения легирующих примесей по сечению фазовращателя, формирующего u -образный pn -переход. Формирование такой формы pn -перехода возможно путём четырёх ступенчатого легирования с разными имплантационными энергиями и перекомпенсации Si . Концентрации примесей не были оптимизированы и выбирались следующими: 10^{20} см^{-3} для контактных $P++$ и $N++$ областей и 10^{18} см^{-3} для P и N областей.

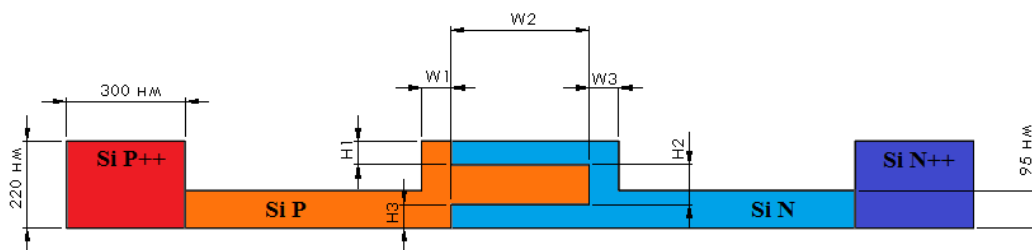


Рисунок 2. Распределение концентраций легирующих примесей в поперечном сечении фазовращателя на основе u -образного pn -перехода. Размеры областей приведены в Таблице 1.

Таблица 1 Значение геометрических размеров u -образного pn -перехода.

Обозначение	Величина, нм	Обозначение	Величина, нм
$W1$	75	$H1$	60
$W2$	350	$H2$	100
$W3$	75	$H3$	60

3. Теория

Изменение показателя преломления и поглощения Si для длины волны 1,55 мкм оценивается по эмпирическим формулам[3]

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -(8,8 * 10^{-22} \Delta N_e + 8,5 * 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}) \quad (1)$$

$$\Delta \alpha = \Delta \alpha_e + \Delta \alpha_h = 8,5 * 10^{-18} \Delta N_e + 6,0 * 10^{-18} \Delta N_h \quad (2)$$

где ΔN_e , ΔN_h – изменения концентраций свободных носителей, Δn_e , Δn_h – изменение показателя преломления, вызванные неравновесными концентрациями электронов и дырок, $\Delta \alpha_e$, $\Delta \alpha_h$ – изменение показателя поглощения, вызванное неравновесными концентрациями электронов и дырок.

Изменение эффективного показателя преломления и поглощения в зависимости от эффекта дисперсии плазмы дается интегралами перекрытия между областями распределения энергии моды волновода и показателем преломления или поглощения в сечении волновода

$$\Delta n_{eff}(z) = \frac{\iint \Delta n(x, y, z) |E(x, y, z)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y, z)|^2 dx dy} \quad (3)$$

$$\Delta \alpha_{eff}(z) = \frac{\iint \Delta \alpha(x, y, z) |E(x, y, z)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y, z)|^2 dx dy} \quad (4)$$

где z – направление распространения волноводной моды, x и y – координаты в плоскости поперечного сечения фазовращателя, $E(x, y, z)$ – поле волноводной моды, $\Delta n(x, y, z)$ и $\Delta \alpha(x, y, z)$ – изменение коэффициентов преломления и отражения за счёт эффекта дисперсии плазмы. В итоге изменение фазы вычисляется по формуле

$$\Delta \varphi = 2\pi \Delta n_{eff} L / \lambda \quad (5)$$

В фазовращателе должен произойти сдвиг фазы на π радиан, поэтому его длина вычисляется по формуле

$$L = \lambda / (2\Delta n_{eff}) \quad (6)$$

Для нахождения глубины модуляции необходимо найти интенсивность светового сигнала на выходе модулятора. Общая формула для выходной мощности модулятора с фазовращателем в одном плече выражается на основе формул для интерферометра Маха-Цендера [4] и даётся следующим выражением:

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{4} |e^{-i(\beta_1(L_1-L_3)+\beta_3L_3)-\frac{\alpha_1}{2}(L_1-L_3)-\frac{\alpha_3}{2}L_3} + e^{-i\beta_2L_2-\frac{\alpha_2}{2}L_2}|^2 \quad (7)$$

где $\beta = 2\pi n_{eff} / \lambda$ – константа распространения, P_{in} – мощность на входе в интерферометра Маха-Цендера, индекс 1 обозначает плечо с фазовращателем, 2 – без фазовращателя, 3 – сам фазовращатель. После тригонометрических преобразований она принимает вид, который удобно использовать в численных расчётах:

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{4} \left[e^{-\alpha_1(L_1-L_3)-\alpha_3L_3} + e^{-\alpha_2L_2} + 2e^{\left(-\frac{\alpha_1}{2}(L_1-L_3)-\frac{\alpha_3}{2}L_3-\frac{\alpha_2}{2}L_2\right)} \cos(\beta_1(L_1-L_3) + \beta_3L_3 - \beta_2L_2) \right] \quad (8)$$

При оценке длины плеч модулятора необходимо учитывать наведённый легированием сдвиг фазы в фазовращателе, который негативно влияет на выходную характеристику сигнала модулятора. Скомпенсировать этот сдвиг можно задавая длину плеч соотношением:

$$L_2 = L_3(\beta_3/\beta_1 - 1) + L_1 \quad (9)$$

Используя формулу выходной мощности (8) возможно рассчитать коэффициент затухания ER вычисляется по формуле:

$$ER = 10 \log(P_{out max}/P_{out min}) \quad (10)$$

4. Численные расчёты

Численные эксперименты проводились в среде *TCAD* [5]. Распределение неравновесных концентраций носителей заряда в поперечном сечении фазовращателя

были получены из решения уравнения Пуассона с граничными условиями и уравнениями непрерывности носителей заряда. Ширина размытия переходов считались равными 25 нм. Омические контакты предполагались идеальными с нулевым сопротивлением.

В стационарном режиме структура моделировалась при напряжениях от 0 до 3В. Из рисунка 3 хорошо видно, что область с изменённым показателем преломления в классической структуре pn -перехода гораздо меньше, чем в структуре с u -образным pn -переходом. В то же время изменение показателя преломления в структуре с u -образным переходом, в отличие от структуры с классическим pn -переходом, происходит в основном в центральной части волновода, что обеспечивает лучшее перекрытие с волноводной модой.

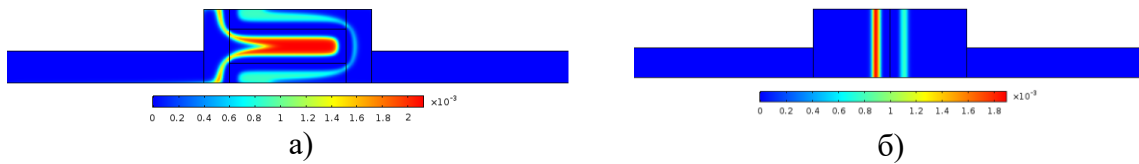


Рисунок 2. Изменение показателя преломления в фазовращателе при обратном напряжении 3В а) u -образного pn -перехода; б) горизонтального pn -перехода.

Максимальная глубина модуляции, внутренние потери и параметр $V\pi L$ были оценены в предположении нулевых волноводных потерь ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0$) в диапазоне напряжений от 0,5 В до 3 В (рисунок 4). Рост глубины модуляции и снижение внутренних потерь при увеличении обратного напряжения объясняется оттоком носителей заряда из области pn -перехода.

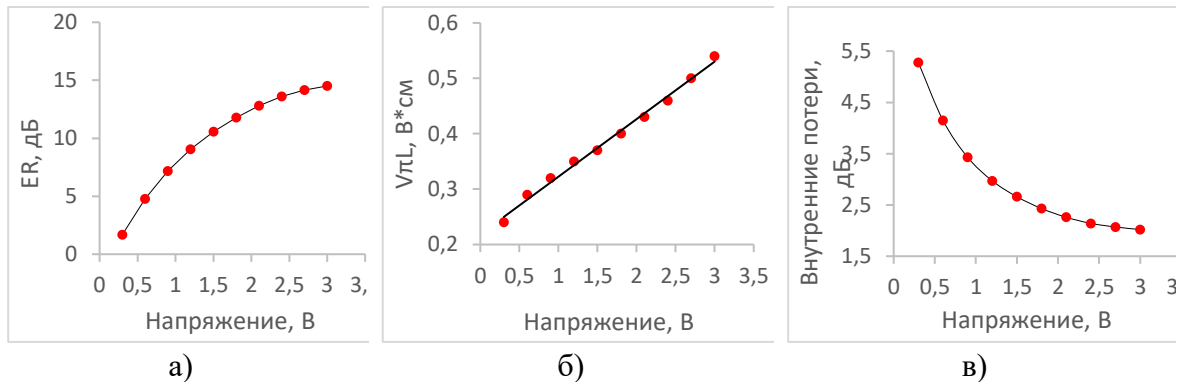


Рисунок 4 Параметры модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера с u -образным pn -переходом в зависимости от напряжения а), глубины модуляции б), $V\pi L$ в) внутренние потери

Расчеты при подаче на структуру прямоугольного импульса по напряжению позволяют оценить рабочую частоту модулятора. Параметры структуры были выбраны такими же как и в стационарном случае. Амплитуда импульса задавалась равной 3 В, длительность нарастания/спада были выбраны равными 1 пс, общая длительность импульса равнялась 50 пс (рисунок 5 а), что соответствует частоте в 20ГГц.

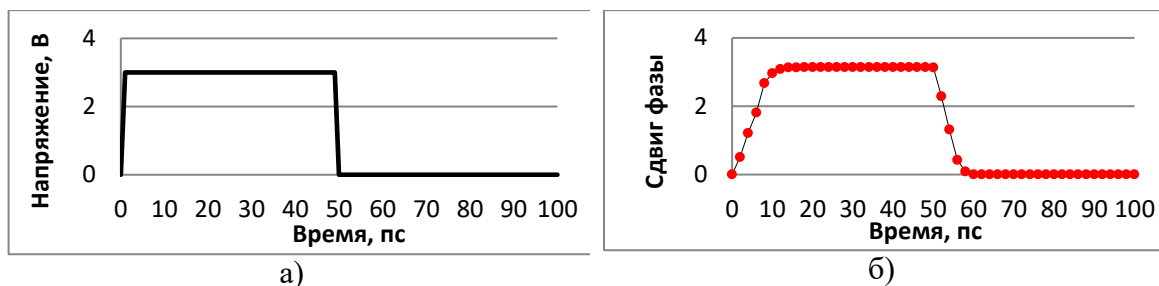


Рисунок 3 Моделирование прямоугольного импульса по напряжению а) профиль импульса напряжения б) сдвиг фазы в зависимости от времени

В результате моделирования была получена зависимость сдвига фазы (5) от времени (рисунок 5 б). Нелинейность нарастания и спада сдвига фазы объясняется дрейфовыми и диффузионными токами. Полный временной интервал изменения сдвига фазы составил порядка 60 пс, полная ширина на уровне половинной амплитуды составила 47 пс. В первом приближении рабочая частота может быть оценена приблизительно в 20 ГГц, а битрейт в таком случае составит порядка 40 Гбит/с.

В таблице 2 приведены параметры различных модуляторов на основе интерферометра Маха - Цендера. Рассмотренный в данной работе модулятор имеет преимущество по глубине модуляции и параметру $V\pi L$.

Таблица 2. Сравнение метрик кремниевых модуляторов с фазовращателем на основе классического pn -перехода, pin диода, pn -перехода с компенсацией легирования и pin диода.

Тип фазовращателя	Длина фазовращателя, мм	Глубина модуляции на 40 или 50 Гбит/с, дБ	$V\pi L$, В*см
Классический pn -переход [6]	1	3,5	2,7
Классический pn -переход [7]	0,5	6,6	0,85
Классический pn -переход [8]	2	6,7	2,4
pin диод [9]	0.95	3.2	3.5
pin диод [10]	0.25	4.3	1.3
pn -переход с компенсацией легирования [11]	4.45	5.56	2.67
Данная работа	1,8	14.5	0,54

Заключение

В статье проведены приблизительные расчёты параметров модулятора Маха-Цендера с фазовращателем на основе u -образного pn -перехода в одном плече, выполненного на основе КНИ структуры. Глубина модуляции составила около 14.5 дБ при длине фазовращателя 0,18 см и обратном напряжении 3В. Рабочая частота модулятора достигает 20 ГГц.

Список литературы

1. Красников Г.Я., Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов / Г.Я. Красников // Техносфера – 2011 – С.87.
2. Reed G. T., “Silicon optical modulators” / G. T. Reed, [at al.] // Nature Photonics – 2010 – Vol.4 – P. 518 – 526.
3. Soref, R., Electrooptical effects in silicon / R. Soref, [at al.] // IEEE J. Quant. Electron. – 1987– Vol.23 – P. 123–129.
4. Lukas C., Silicon Photonics Design from devices to systems /C. Lukas, [at al.] // Cambridge University’s Press – 2015 – P.114.
5. <http://www.silvaco.com>
6. Thomson D. J., High contrast 40Gbit/s optical modulation in silicon / D. J. Thomson, [at al.] // Opt. Express – 2011 – Vol.19 – P.11507–11516
7. Brimont A., High-contrast 40 Gb/s operation of a 500 μ m long silicon carrier-depletion slow wave modulator / A. Brimont, [at al.] // Opt. Lett. –2012 – Vol.37–P. 3504 – 3506.
8. Thomson D., 50Gbit/s silicon optical modulator / D. Thomson, [at al.] // IEEE Photon. Technol. Lett. – 2012– Vol.24 – P. 234 – 236.

9. Ziebell M., 40 Gbit/s low-loss silicon optical modulator based on a p-i-n diode / M. Ziebell, [et al.] // Opt. Express – 2012 – Vol.20 – P.10591–10596.
10. Akiyama S., 50-Gbit/s silicon modulator using 250- μm -Long phase shifter based on forward-biased p-n diodes / S. Akiyama, [et al.] // Proceedings of 9th IEEE International Conference on Group IV Photonics – 2012– P.192–194.
11. Xiaoguang Tu, 50-Gb/s silicon optical modulator with traveling-wave electrodes / Xiaoguang Tu, [et al.]//Optical Society of America – 2013.