

Макаров М.Э.¹, Итальянцев А.Г.¹, Барабаненков М.Ю.²
¹АО «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники»

²Институт проблем технологии микроэлектроники
и обособленных материалов РАН

Частотное ограничение интегрального фазового модулятора на основе кремниевого р-і-п диода в субнаносекундном импульсном режиме

Рассмотрен интегральный амплитудный модулятор, выполненный на основе полоскового интерферометра Маха-Цендера в верхнем слое Si структуры Кремний – На – Изоляторе. В одно из двух плеч интерферометра, представляющих собой Si полосковые волноводы, встроены р-і-п диоды, управляемый внешним высокочастотным электрическим сигналом. Численно исследовано изменение эффективного показателя преломления Si волновода (на длине волны 1.5 мкм) в области р-і-п диода в субнаносекундном импульсном режиме, обусловленного эффектом дисперсии твердотельной плазмы свободных носителей Si. В частности, показано, что максимальная рабочая частота модулятора ограничена величиной 0.5 ГГц при типичных параметрах Si р-і-п диода.

Ключевые слова: микрофотоника, планарный волновод, модулятор Маха-Цендера, р-і-п диод.

Введение

Как известно, развитие микроэлектроники связано с постоянным уменьшением топологических размеров [1] динамика которых описывается эмпирическим законом Мура [2], согласно которому количество транзисторов в интегральной схеме (ИС) удваивается каждые два года. В настоящее время уплотнение ИС за счет уменьшения геометрических размеров интегральных транзисторов приблизилось к фундаментальным физическим ограничениям, таким как принцип Ландауэра [3] (нижняя граница минимального значения теплоты, выделяемого интегральной схемой при потере одного бита информации), длина свободного пробега носителей заряда в Si (ограничивает масштабирование МОП-транзисторов на уровне 5 нм), длина канала МОП-транзистора (при длине канала, меньшей 1.5 нм, невозможна локализация электрона в конкретной функциональной области транзистора). Перечисленные ограничивающие факторы подтолкнули поиск принципиально новых решений, направленных на увеличение быстродействия интегральных схем. Одним из таких решений является переход от полностью электронных устройств к смешанным фотонно-электронным ИС.

Ключевым элементом компонентной базы фотонно-электронных ИС, изготавливаемых на основе структур Кремний – На - Изоляторе (КНИ), является амплитудный модулятор, выполненный на основе полоскового интерферометра Маха-Цендера. Модулятор функционирует на длине волны 1.5 мкм (главная телекоммуникационная частота), т.к. Si практически прозрачен на этой длине волны, а подлежащий слой SiO₂ является оптическим буфером.

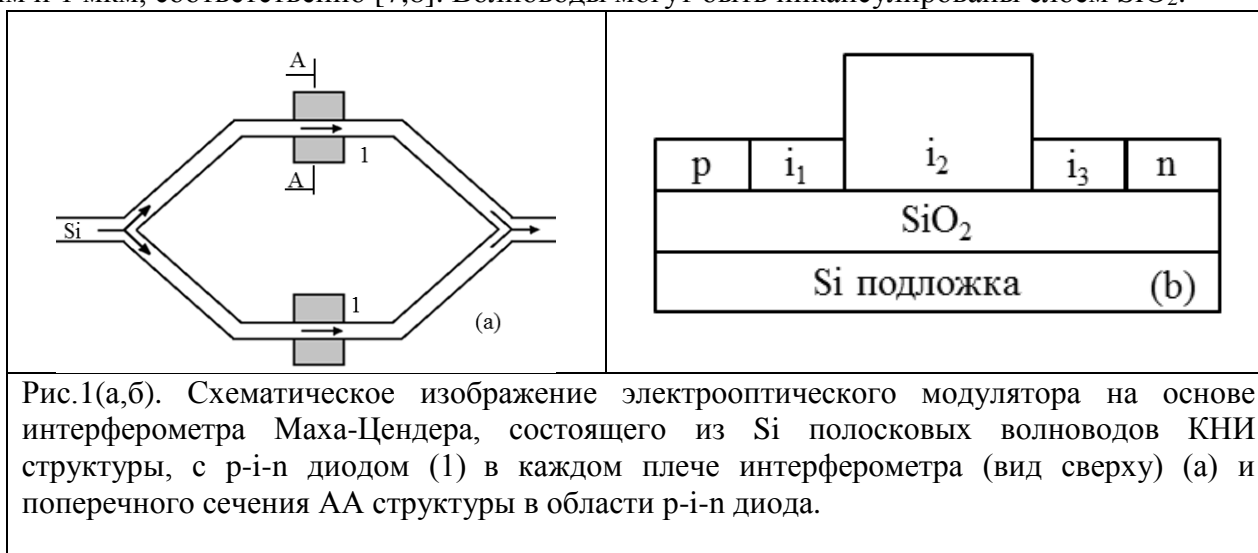
Функционирование фазовых модуляторов может быть основано на одном из эффектов, обуславливающих изменение показателя преломления Si. Среди них, термо- и электрооптический эффекты, эффект Франца-Келдыша и дисперсии свободных носителей

заряда (эффект дисперсии твердотельной плазмы). Известно, что термооптический эффект ограничивает частоту модуляции ниже 1 МГц [4], линейный эффект Поггеля отсутствует, а квадратичный пренебрежимо мал в ненапряженном кристаллическом Si [5]. Также малы эффекты Керра и Франца-Келдыша. Поэтому, высокочастотные электрооптические модуляторы в составе интерферометра Маха-Цендера обычно основаны на эффекте дисперсии твердотельной плазмы Si [5].

В данной работе проводится численное моделирование функционирования высокочастотного электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цендера.

Устройство электрооптического модулятора

Как известно [6], большой диэлектрический контраст между Si и SiO₂ в ближнем ИК диапазоне (длина волны 1.3 – 1.55 мкм) делает возможным создание наноразмерных полосковых Si волноводов с малыми потерями. Практически волноводы изготавливаются из верхнего Si слоя КНИ структур с характерной толщиной Si и SiO₂, составляющими 200 – 300 нм и 1 мкм, соответственно [7,8]. Волноводы могут быть инкапсулированы слоем SiO₂.



На основе полосковых волноводов конструируется интерферометр Маха-Цендера, состоящий, например, из двух Y-образных ЗдБ полосковых разветвителей/смесителей в разрыве полоскового волновода (рис.1(а)). Волноводная мода разделяется по интенсивности между двумя плечами интерферометра. Для построения электрооптического амплитудного модулятора в одно (или в оба) плеча интерферометра встраивается устройство сдвига фазы волноводной моды, например, в виде р-і-п диода (рис.1(б)), на который подается управляющий высокочастотный электрический сигнал. Высоколегированные р- и n- области диода располагаются по обе стороны от волновода и в несколько раз его тоньше (рис.1(б)). Волновод является нелегированной i₂-областью диода. Создание дополнительных нелегированных i₁ и i₃ областей (рис.2(б)) приводит к тому, что р-і-п диод является малой неоднородностью в волноводе, не приводящей к существенным потерям энергии моды [9]. Локальное изменение коэффициента преломления Si, обусловленное изменением концентрации свободных носителей, обеспечивается истощением i-области при обратном включении или инжекцией носителей при прямом включении диода.

Численные расчёты

Расчёты проводились в среде TCAD [10] Распределение концентрации неравновесных дырок ΔN и электронов ΔP по поперечному сечению р-і-п области находилось из решения уравнения Пуассона с граничными условиями ($E_{fn,1} = E_{fn,2}$; $E_{fp,1} = E_{fp,2}$; $D_1 = D_2$) и

уравнениями непрерывности носителей заряда ($q \frac{\partial n}{\partial t} = -\nabla * J_n - qU_n$; $q \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla * J_p - qU_p$, где $U_n = \sum R_{n,i} - \sum G_{n,i}$, $U_p = \sum R_{p,i} - \sum G_{p,i}$; $G_{n,i}$, $G_{p,i}$ и $R_{n,i}$, $R_{p,i}$ - скорости генерации и рекомбинации, соответственно, электронов и дырок. Электрическая индукция, ток электронов и дырок через границу p-i-n области считались равными нулю: $n * J_n = 0$, $n * J_p = 0$, $n * D = 0$, где n - вектор нормали к границе, J_n , J_p - токи электронов и дырок, соответственно). Омические контакты предполагались идеальными с нулевым сопротивлением. Параметры структуры приведены в Табл.1.

Область модулятора	Толщина, нм	Длина, нм	Концентрация легирующей примеси, см ⁻³ ,
p	50	200	10 ¹⁹ , акцепторная
i1	50	200	10 ¹⁶ , акцепторная
i2	250	400	10 ¹⁶ , акцепторная
i3	50	200	10 ¹⁶ , акцепторная
n	50	200	10 ¹⁹ , донорная

Таблица 1. Параметры моделируемых модуляторов.

Изменение показателя преломления Si вычислялось по эмпирической формуле [6,10]

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8,8 * 10^{-22} * \Delta N + 8,5 * 10^{-18} * (\Delta P)^{0,8}] \quad (1)$$

где Δn_e , Δn_h - вклады неравновесных концентраций электронов и дырок, соответственно, в изменение коэффициента преломления Si. Сдвиг фазы излучения на выходе из модуля фазового сдвига зависит от величины изменения показателя преломления (1), длины модуля фазового сдвига, L, и длины волны λ [12]

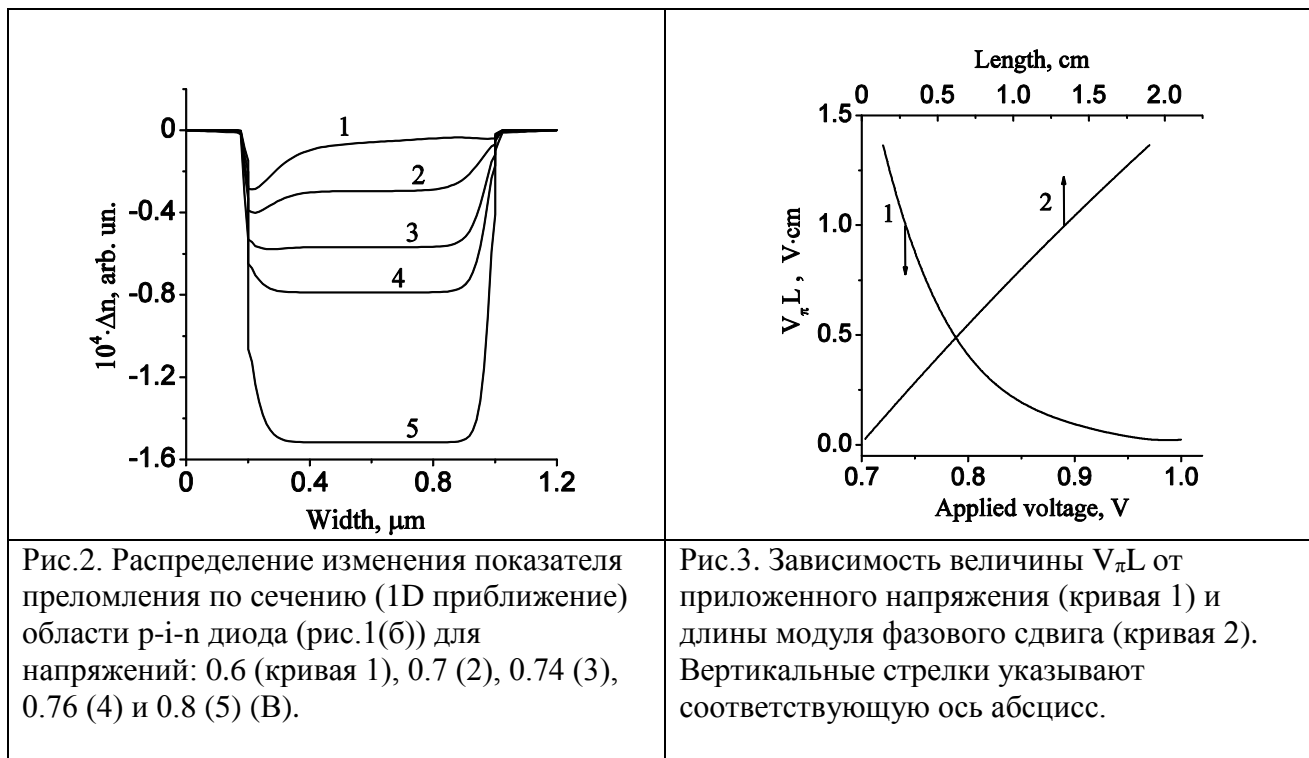
$$\Delta \varphi = (2\pi/\lambda)\Delta n \cdot L \quad (2)$$

Расчеты проводились для случая подачи на диод субнаносекундного прямоугольного электрического импульса по напряжению, а также для постоянного тока и нулевого потенциала в 1D и 2D случае. Режим постоянного тока и нулевого потенциала использовался для оценки времени релаксации концентрации неравновесных носителей.

Одномерное приближение

В 1D случае рассмотрены режимы постоянного тока и прямоугольного импульса по напряжению. В режиме постоянного тока получены зонные диаграммы диода и распределения концентраций носителей заряда с последующей оценкой изменения коэффициента преломления Si по формуле (1), сдвига фазы по формуле (2) и параметра $V_\pi L$, а в режиме импульса напряжения — время релаксации концентрации неравновесных носителей.

В 1D случае рассматривалось поперечное сечение p-i-n диода (рис.1(б)), состоящее из p- (10^{19} доноров/см³), i- (фоновая концентрация 10^{16} акцепторов/см³) и n- (10^{19} акцепторов/см³) областей Si с длинами 200, 800 и 200 нм, соответственно. Задавалось прямое включение p-i-n диода при постоянных напряжениях на катоде от 0.3 В до 0.5 В и на аноде от -0.3В до -0.5В. Пример расчета приведен на рис.2. Как видно максимальное значение изменения коэффициента преломления соответствует теоретическим данным $\Delta n \sim 10^{-3}$ [7].



Оценка длины модуля фазового сдвига и рабочего напряжения была сделана из следующих соображений. При увеличении напряжения, при котором достигается сдвиг фазы на π , параметр $V_{\pi}L$ уменьшается (рис.3, кривая 1), а длина модулятора L растёт (рис.3, кривая 2). Условие $V_{\pi}L \approx 1$ (см. стрелки на рис.3) выполняется при длине модуля фазового сдвига $L = 1.37$ см и приложенном напряжении $V = 0.74$ В, при этом величина потерь составляет 3.42 дБ.

В режиме прямоугольного импульса по напряжению при прямом включении р-і-п диода (длительность импульса 250 пс, время нарастания/спада напряжения 1 пс, период следования импульсов 2 нс, амплитуда импульса 0.74 В) время полной релаксации неравновесных носителей после прохождения импульса (неравновесные носители из разных импульсов не перекрываются) составило 1.7 нс.

Двумерное приближение

В 2D случае были рассчитаны концентрации носителей заряда при постоянном напряжении на катоде 0.74 В и на аноде 0 В, а также для прямоугольного импульса по напряжению. Концентрации электронов и дырок в состоянии покоя равны друг другу и постоянны по величине, их резкое изменение происходит в переходной области шириной ~ 70 нм внутри волновода. При постоянном напряжении (постоянный ток) переходная область расширяется, градиент концентраций становится более плавным. В случае прямоугольного импульса по напряжению полная релаксация носителей от состояния постоянного напряжения 0.74 В до состояния нулевого потенциала происходит за 1.7 нс при длительности импульса 250 пс и времени нарастания и спада напряжения 1 пс.

Заключение

В статье рассчитана временная эволюция распределения концентрации неравновесных носителей заряда в поперечном сечении р-і-п диода в микрополосковом плече фазового модулятора Маха-Цендера. Распределение концентраций носителей заряда в случае прямоугольного импульса по напряжению качественно согласуется с распределениями, полученными при постоянном токе и нулевом потенциале, а также с зонными диаграммами, описывающими релаксационные процессы внутри р-і-п диода. Показано, в частности, что релаксация неравновесных носителей заряда происходит за 1.7 нс при длительности

импульса 250 пс, что соответствует частоте модуляции порядка 0.5 ГГц. Кроме того, проведена оценка оптимальной длины модуля фазового сдвига и оптимального напряжения, при которых достигается сдвиг фазы на π . Так, параметр $V_{\pi}L$ достигает величины 1 В·см при длине модуля фазового сдвига 1.37 см и приложенном напряжении 0.74 В. Величина потерь при этом составляет 3.42 дБ.

Библиографический список.

1. Г. Красников Конструктивно-Технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов. Москва: Техносфера, (2011).
2. G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits". Electronics, vol. 38, Is.8, pp.114 - 117 (1965)
3. R. Landauer, "Irreversibility and heat generation in the computing process", IBM J. Res. Dev., vol. 5, pp.183–191 (1961)
4. C. Cocorullo, M. Iodice, I. Rendina, P. M. Sarro, "Silicon thermo-optical micro-modulator with 700 kHz 3 dB bandwidth," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 7, pp. 363–365 (1995).
5. R. A. Soref, B. R. Bennett, "Electrooptical effects in silicon," IEEE J. Quantum Electron., vol.23, Is.1, pp. 123-129 (1987).
6. L. C. Kimerling, "Photons to the rescue: microelectronics becomes microphotonics," The Electrochem. Soc. Interface, vol.9, Is.2, p. 28 – 31 (2000).
7. C. A. Barrios, V. R. Almeida, R. Panepucci, M. Lipson, "Electrooptic Modulation of Silicon-on-Insulator Submicrometer - Size Waveguide Devices, J. Lightwave Technol., vol. 21, Is.10, pp. 2332 - 2339 (2003)
8. V. A. Almeida, R. Panepucci, and M. Lipson, "Nanotaper for compact mode conversion," Opt. Lett., vol. 28, Is.15, pp. 1302–1304 (2003).
9. F. Gan, "High-Speed Silicon Electro-Optic Modulator for Electronic Photonic Integrated Circuits", Thesis (Ph. D.) Massachusetts Institute of Technology. 2007, pp. 34–38.
10. <http://www.silvaco.com>
11. M. Nedeljkovic, R. Soref, G. Mashanovich, "Free-carrier electrorefraction and electroabsorption modulation predictions for silicon over the 1-14 μ m infrared wavelength range," J. Photonics, vol. 3, pp. 1171–1180 (2011).
12. G. T. Reed, A. P. Knights, Silicon Photonics: An Introduction, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2004