

УДК 621.372.8

Волноводный оптический модулятор на структуре «кремний на изоляторе»

Н. В. Масальский

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН
Россия, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, к. 1

Обсуждается перспективный подход для реализации эффективной оптической модуляции на основе волноводной структуры, выполненной по стандартной технологии «кремний на изоляторе». На основе численных расчётов определены пути оптимизации конструкции устройства.

Ключевые слова: кремниевая фотоника, волноводный оптический модулятор, кремний на изоляторе.

В настоящее время интенсивно развивается направление оптоэлектроники, получившее название кремниевой фотоники [1, 2]. Эта область связана с разработкой оптоэлектронных устройств, совместимых с кремниевой технологией, в частности, технологией КНИ (кремний на изоляторе), которая широко используется в микроэлектронике. Переход оптоэлектроники на кремниевую платформу позволит в полной мере использовать достижения полупроводниковой индустрии и существенно сократит затраты на производство оптоэлектронных устройств. К настоящему времени значительный успех достигнут в создании целого ряда устройств, в частности, кремниевых модуляторов [2].

Реализация широкополосной оптической модуляции является одной из приоритетных задач систем обработки информации. В практическом плане широкополосная модуляция может осуществляться при использовании устройства, выполненного на КНИ структуре, которое встроено в кремниевый волноводный интерферометр Маха–Цендера (рис. 1).

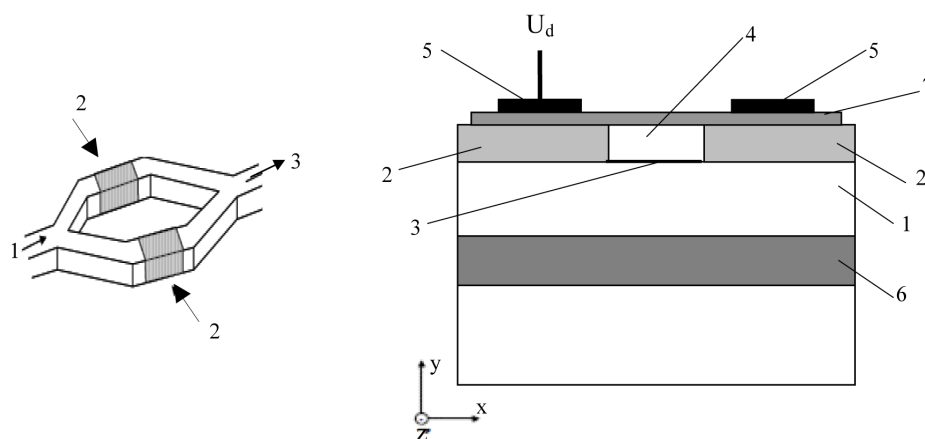


Рис. 1. Структурные схемы: левый — интерферометр Маха–Цендера, правый — фазовращатель

В интерферометре падающая оптическая волна 1 распространяется через каждое его плечо, которое может содержать фазовращатель 2, где приложенное к нему напряжение вызывает изменение показателя преломления волноводного канала, что влечёт небольшое изменение скорости света в волноводе, и в конечном

итоге по длине активной области оптическая волна испытывает фазовую модуляцию. Скоростные различия приводят к разности фаз двух волн в модуляторе. В зависимости от их относительной фазы после прохождения через плечи восстановленная волна 3 будет испытывать модуляцию интенсивности.

Основным компонентом кремниевого модулятора является фазовращатель, который определяет основные характеристики устройства — такие как полоса модуляции, потребляемая мощность, габариты и вес. Структурная схема фазовращателя также представлена на рис. 1. На высоколегированной рабочей области 1 кристаллического кремния n -типа с толщиной H_0 размещена в форме ребра с высотой h и шириной W область 4 поликристаллического кремния p -типа. Эти два элемента формируют гребенчатый оптический волновод (его максимальная высота $H=H_0+h$), по которому оптический пучок распространяется вдоль оси z . Между компонентами 1 и 4 расположен затвор 3 из тонкого слоя окиси кремния. Рабочая область отделена от подложки толстым слоем погруженного окисла 6. Окисные элементы 2 по обе стороны от ребра поддерживают горизонтальное оптическое ограничение и препятствуют тому, чтобы оптическое поле проникло в металлические контактные площадки 5. Вертикальное оптическое ограничение обеспечивается погруженным окислом и покрытием 7 из поликристаллического кремния.

В данной работе численно исследуется возможность обеспечения полосы модуляции более 25 ГГц, а в перспективе — до 100 ГГц при использовании КНИ фазовращателя.

В рассматриваемой конструкции фазовый сдвиг $\Delta\phi$, возникающий в результате изменения эффективного показателя преломления $\Delta N_{\text{эфф}}$ волноводной моды, аппроксимируется выражением [2]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_0} L \Delta N_{\text{эфф}}, \quad (1)$$

где L — длина фазовращателя (в z -направлении), λ_0 — длина волны света в вакууме.

В общем случае эффективный показатель преломления волноводной моды является комплексным. Его действительная часть применяется для того, чтобы вычислить фазовый сдвиг, а мнимая часть используется для моделирования оптических потерь фазовращателя.

Изменение эффективного показателя преломления проистекает вследствие накопления заряда с обеих сторон затворного окисла, которое происходит из-за подачи положительного напряжения U_d на фазовращатель. Изменение плотности заряда ΔN_e (для электронов) и ΔN_h (для дырок) связано с напряжением U_d соотношением:

$$\Delta N_{e,h} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{ox}}{q t_{ox} t} (U_d - U_{FB}), \quad (2)$$

где ε_0 и ε_{ox} — вакуумная диэлектрическая проницаемость и низкочастотная диэлектрическая проницаемость окиси кремния соответственно, q — заряд электрона, t_{ox} — толщина окиси затвора, t — эффективная толщина зарядового слоя, и U_{FB} — напряжение плоских зон КНИ структуры. Это соотношение не противоречит экспериментальным результатам [2]. В присутствии свободных зарядов оптические свойства кремниевого волновода модифицируются в результате дисперсионного эффекта, связанного со свободными плазмонами [3]. Из соотношений, приведённых в работе [3], вытекают эмпирические выражения, связывающие плотность свободных зарядов и реальную часть показателя преломления.

Для компьютерного моделирования характеристик фазовращателя необходимо совместное решение, с одной стороны, связанных 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. Для моделирования электрических характеристик использовался пакет моделирования Silvaco [4], оптические характеристики вычислялись методом

распространяющихся пучков (beam propagation method (BMP)), реализованным в коммерческой программе VeamPROP [5].

Для численных расчётов характеристик фазовращателя использовались следующие основные электрические и оптические параметры: длина волны света в вакууме — 1,558 мкм; температура — 298°К; показатель преломления кремния — 3,47; показатель преломления поликремния — 3,45; показатель преломления окиси кремния — 1,44; базовый уровень легирования кремния — 10^{15} см^{-3} ; подвижность электронов — $700 \text{ см}^2 (\text{В}\cdot\text{с})^{-1}$; подвижность дырок — $300 \text{ см}^2 (\text{В}\cdot\text{с})^{-1}$; напряжение плоских зон — 1,25 В; толщина погруженного окисла — 0,4 мкм.

Проанализируем эффективность фазовой модуляции в зависимости от геометрии волновода. Для этого моделируем фазовый сдвиг как функцию напряжения питания для трёх различных размерностей поперечного сечения волновода с одинаковой продольной длиной $L = 2,5 \text{ мм}$. Образец 1 является экспериментально апробированным устройством, взятым из [2], размеры волновода которого: $W = 2,5 \text{ мкм}$, $H = 2,3 \text{ мкм}$, $h = 0,9 \text{ мкм}$ и $t_{ox} = 12 \text{ нм}$. Размеры волновода образца 2: $W = 1,0 \text{ мкм}$, $H = 1,0 \text{ мкм}$, $h = 0,6 \text{ мкм}$ и $t_{ox} = 12 \text{ нм}$, образца 3: $W = 0,8 \text{ мкм}$, $H = 0,8 \text{ мкм}$, $h = 0,45 \text{ мкм}$ и $t_{ox} = 6 \text{ нм}$.

Результаты моделирования приведены на рис. 2. Следует отметить, что по результатам моделирования волноводы являются одномодовыми с TE -поляризацией. Как видно из рис. 2, масштабирование геометрии волновода значительно улучшает фазовый сдвиг для данной длины устройства и напряжения питания. Такой подход предоставляет дополнительную возможность варьирования конструкцией системы в целом, чтобы выбрать удобные напряжения питания и/или длины устройства для совместимости с выбранным приложением. На рис. 2 также приведены экспериментально измеренные значения фазового сдвига для образца 1, которые находятся в хорошем согласовании с результатами моделирования.

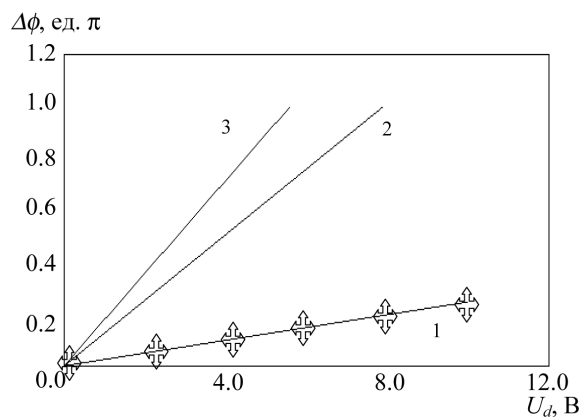


Рис. 2. Зависимость фазового сдвига от управляющего напряжения для разных устройств, где 1 — образец 1, 2 — образец 2, 3 — образец 3. Крестиком обозначены экспериментальные данные

Исследуем зависимость фазовой модуляции от толщины затвора t_{ox} . Из вышеприведённого соотношения следует, что с уменьшением t_{ox} напряжение питания нужно снижать пропорционально, чтобы получить то же самое изменение плотности заряда. Сокращение U_d не только упрощает схему модулятора, но также и уменьшает полное рассеяние мощности. Чтобы оценить влияние толщины окиси затвора на фазовую эффективность, необходимо фиксировать изменение плотности индуцированного заряда. На рис. 3 приведены результаты моделирования параметра L_π (L_π — длина фазовращателя при которой $\Delta\varphi = \pi$) как функция толщины затвора для образца 1.

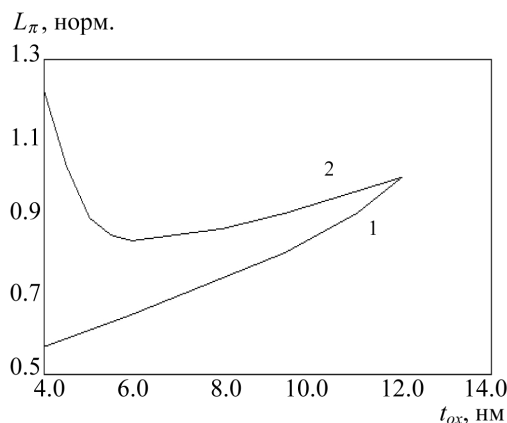


Рис. 3. Зависимость нормированной длины модуляции L_π (относительно L_π для образца 1) от толщины затвора t_{ox} , где 1 — $\Delta N_{e,h} = \text{const}$, 2 — $E = 0,5 \text{ В/нм}$

Мы выбрали значения $t_{ox} = 12 \text{ нм}$ и $U_d = 6 \text{ В}$ как отправную точку, и при уменьшении толщина окиси затвора снижали напряжение питания, чтобы сохранить ΔN_e и ΔN_h фиксированными. Например, когда $t_{ox} = 6 \text{ нм}$, напряжение питания составляет $U_d = 3,25 \text{ В}$. В случае фиксированной плотности зарядов фазовая эффективность монотонно увеличивается с уменьшением толщины затвора.

С другой стороны, напряжение пробоя затвора снижается с уменьшением толщины окисла. Следовательно, напряжение питания не может превысить напряжение пробоя. Из экспериментальных данных следует, что при напряжённости поля 1 В/нм фазовращатель функционирует в обычном режиме [1]. На рис. 3 также приведены результаты моделирования параметра L_π как функции толщины окиси затвора с фиксированной напряжённостью электрического поля $E = 0,5 \text{ В/нм}$. В случае фиксированной напряжённости электрического поля первоначально увеличивается фазовая эффективность, когда окисная толщина уменьшается. Однако оно меньше, чем для случая фиксированной плотности зарядов. Начиная с некоторого значения толщины окисла (в рассматриваемом случае меньше 6 нм), эффективность фазовой модуляции уменьшается. Это вызвано тем, что соответствующий уровень напряжения питания сопоставим с напряжением плоских зон U_{FB} , что существенно снижает плотность индуцированного заряда. Следовательно, есть оптимальная толщина окисла затвора, дающая лучшую фазовую эффективность.

Проанализируем зависимость эффективности фазовой модуляции от глубины затвора h . С этой целью промоделируем параметр L_π для выбранных размерностей волноводов при различных глубинах. Представляя результаты расчётов в координатах $h/H/2$ и $L_\pi/L_{\pi \min}$, получим характеристическую кривую для всех рассматриваемых образцов, которая приведена на рис. 4.

Из полученных результатов следует, что эффективность фазовой модуляции существенно зависит от глубины затвора. При этом параметр L_π уменьшается с увеличением глубины травления, а когда затвор располагается близко к центру волновода вдоль направления Y , достигается минимальное значение L_π , что соответствует максимальной фазовой эффективности. Следует отметить, что когда относительная глубина травления больше чем $0,9$, волновод может стать многомодовым.

Один из главных параметров модулятора — полоса пропускания определяется полосой пропускания фазовращателя, которая напрямую связана с его ёмкостью [2]. Уменьшение геометрических размеров и повышение уровня легирования волноводной структуры являются эффективным методом снижения ёмкости. Для расчёта полосы пропускания моделируется переходной процесс в фазовращателе,

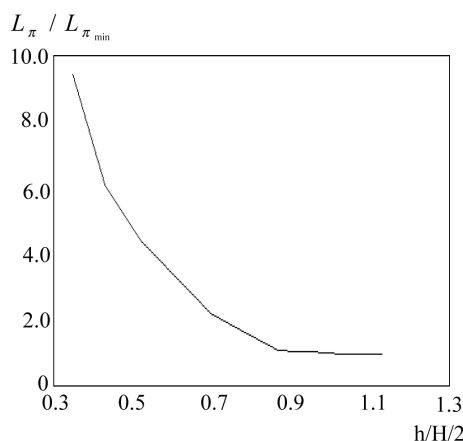


Рис. 4. Характеристическая зависимость относительной эффективности модуляции от приведенной глубины затвора

где вычисляется временная зависимость плотности индуцированного заряда на границе раздела окисл/кремний. Для образца с геометрией волновода 0,8 мкм, 0,8 мкм, 0,45 мкм и уровнем легирования $1,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ рассчитана полоса пропускания, которая по уровню 3 дБ составляет более 30 ГГц. Пропускная способность может масштабироваться к ещё более высоким значениям с более высокими концентрациями легирования. Например, при уровне легирования $4,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ расчётная полоса пропускания будет составлять порядка 100 ГГц. Снижение продольных размеров волновода требует пропорционального повышения напряжения питания, что влечёт увеличение толщины окисла затвора и, несмотря на некоторую потерю эффективности модуляции, в конечном итоге получаем выигрыш в величине ёмкости, поскольку более тонкий затвор приводит к более высокой ёмкости устройства.

В заключение сделаем следующие выводы. Теоретически исследованы характеристики кремниевое волноводного модулятора, выполненного на базе КНИ технологии. Рассмотренные модификации устройства отвечают требованиям и ограничениям стандартного КНИ техпроцесса с топологическими нормами 0,5 мкм. Масштабирование геометрии волновода и повышение уровня легирования приводит к увеличению эффективности модуляции и снижению уровня напряжения питания, что напрямую позволяет значительно расширить полосу модуляции вплоть до 100 ГГц. Применение изолирующих слоев в качестве затвора с более высокой диэлектрической проницаемостью (например, окисл цинка) будет являться предпосылкой к улучшению характеристик прибора. Предложенный подход позволяет интегрировать модуляторы как в оптические, так и электронные интегральные схемы, предназначенные для реализации высокопроизводительных систем обработки информации.

Литература

1. 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, No 1. — Pp. 401–412.
2. Silicon Photonics / M. Salib, L. Liao, R. Jones et al. // Intel Technology Journal. — 2004. — Vol. 8, No 2. — Pp. 143–160.
3. Soref R., Bennett B. Electro Optical Effects in Silicon // J. Quantum Electron. — 1987. — Vol. QE-23. — Pp. 123–129.

4. Silvaco International, 4701 Patrick Henry drive, Bldg 1, Santa Clara, CA 94054. — <http://www.silvaco.com>.
5. RSOFT Design Group. — <http://www.rsoftinc.com>.

UDC 621.372.8

Waveguide Optical Modulator in Silicon on Insulator N. V. Masalsky

*Scientific research institute of system researches RAS
36, bld. 1, Nakhimovskij prospect, Moscow, 117997, Russia*

The perspective approach for implementation of effective optical modulation on the basis of the waveguide structure fulfilled through standard technology in silicon on insulator is considered. On the basis of numerical calculations optimization tools of a unit construction are defined.

Key words and phrases: photonics, waveguide optical modulator, silicon on insulator.