

УДК 535.8

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЕВЫХ p - n -ДИОДОВ

© О. В. Наумова, Б. И. Фомин, Ю. А. Живодков, Э. Г. Зайцева,
Д. В. Щеглов, А. В. Латышев

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: naumova@isp.nsc.ru*

Апробирован способ формирования кремниевых электрооптических модуляторов на основе p - n -диодов с использованием локального окисления. Показано, что локальное окисление кремния позволяет сформировать гребень волновода в виде сглаженной трапеции в отличие от классического способа создания гребня волновода прямоугольной формы методом плазмохимического травления. Представлены основные преимущества используемого подхода: контролируемость, воспроизводимость критических конструктивных параметров модуляторов (ширины, высоты гребня волновода), низкая шероховатость поверхности, возможность применения стандартных для планарной технологии подходов при формировании в гребенчатом волноводе модулирующего p - n -диода комбинированной конструкции.

Ключевые слова: электрооптический модулятор, кремний на изоляторе, волновод.

DOI: 10.15372/AUT20190502

Введение. Электрооптические модуляторы (ЭОМ) являются обязательным ключевым компонентом систем передачи информации с использованием светового излучения. Большие потери при передаче электрических сигналов на частотах $f \geq 10$ ГГц посредством обычной металлической разводки и большая скорость передачи данных по оптоволокну (теоретический предел 10^{14} бит/с) определяют актуальность разработки приборов данного типа.

Мотивация изготовления ЭОМ на кремнии обусловлена физическими свойствами систем Si/SiO₂ (разница в коэффициентах преломления света в Si и SiO₂ позволяет локализовать световую волну внутри Si-волновода), развитием технологии плёнок кремния на изоляторе (КНИ) и возможностью изготовления волнопроводов на их основе при использовании хорошо разработанной КМОП-технологии. Это, в свою очередь, упрощает процесс интеграции для кремниевой фотоники (включая возможность формирования гибридных устройств со встраиванием разных материалов в КНИ-волновод), обеспечивает недорогую платформу для промышленного производства систем оптической связи и позволяет изготавливать оптико-электрические интегральные схемы (сетей) чипового масштаба [1, 2].

Основное назначение ЭОМ — преобразование электрического сигнала в оптический с использованием электрического управления световым потоком. Самый распространённый метод модуляции световой волны, применяемый в настоящее время в кремниевых устройствах, базируется на зависимости коэффициента преломления света (его реальной части n и мнимой α) от концентрации свободных электронов N_e и дырок N_h [2, 3]:

$$\Delta n = -8,8 \cdot 10^{-22} \Delta N_e - 8,5 \cdot 10^{-18} (\Delta N_h)^{0,8},$$

$$\Delta \alpha = 8,85 \cdot 10^{-18} \Delta N_e \pm 6,0 \cdot 10^{-18} \Delta N_h.$$

Известными элементами, позволяющими изменять концентрацию свободных носителей заряда, являются p - n -диоды. Поэтому в последние десятилетия велась интенсивная разра-

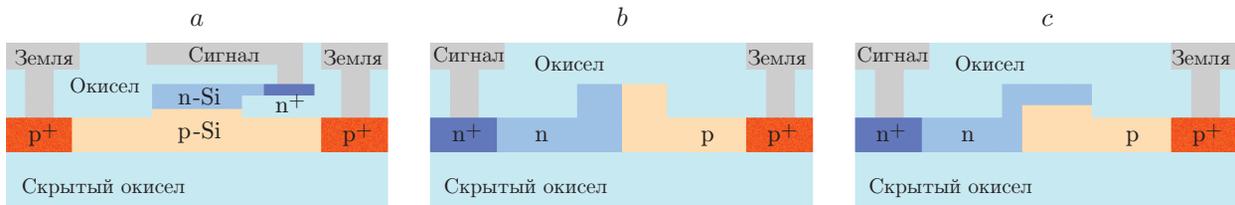


Рис. 1. Схематическое представление вертикальной (а), горизонтальной (б) и комбинированной (с) конструкций ЭОМ на основе Si—*p-n*-диодов

ботка ЭОМ на основе кремниевых *p-n*-диодов с разными конструктивно-технологическими решениями.

Главным элементом ЭОМ является гребенчатый волновод, в котором создаётся модулирующий *p-n*-диод. Геометрия волновода, его конструктивные параметры (высота, ширина гребня, высота основания) критично влияют на режим распространения света, на степень его взаимодействия с областью изменения показателя преломления и в результате на эффективность модулятора. Классически гребень волновода имеет прямоугольную форму и формируется плазмохимическим травлением (ПХТ).

Хорошо известными конструкциями ЭОМ на основе Si—*p-n*-диодов являются вертикальная, горизонтальная и комбинированная конструкции модулятора, последняя сочетает элементы двух предыдущих управляющих *p-n*-диодов в волноводе [1–4] (рис. 1). В вертикальной и горизонтальной конструкциях модулирующие *p-n*-диоды расположены параллельно или перпендикулярно основанию волновода соответственно.

Сравнение оптических параметров модуляторов разных конструкций приведено, например, в [1]. В настоящее время технологии изготовления модуляторов любых конструкций считаются неоптимизированными, а сравнительный анализ показывает, что среди них нет безусловного лидера по оптическим параметрам. Однако конструкции на основе комбинации горизонтальных и вертикальных переходов считаются наиболее перспективными, поскольку в них увеличивается эффективная площадь *p-n*-диода на единицу длины модулятора и соответственно есть возможность повышения эффективности управления световым потоком.

Основными проблемами вертикальной конструкции являются формирование омического контакта к *n*-области диода и уменьшение потерь света в близкорасположенной сильнолегированной области n^+ -контакта (см. рис. 1). В горизонтальной конструкции эти проблемы решены за счёт расположения сильнолегированных контактных n^+ - и p^+ -областей в основании волновода на расстоянии порядка 1 мкм от его гребня. Комбинированная конструкция сочетает преимущества горизонтальной с возможностью повышения эффективности управления световым потоком за счёт увеличения эффективной площади *p-n*-диода на единицу длины модулятора, как отмечалось выше. Однако горизонтальная (соответственно и комбинированная) конструкция требует высокоточного позиционирования *p-n*-диода. В [5] показано, что смещение *p-n*-перехода на 50 нм в горизонтальной конструкции может приводить к уменьшению показателя Δn (эффективности управления световым потоком соответственно) более чем на 40 %.

Для решения проблемы позиционирования в [6] предложена самосовмещённая технология формирования управляющего *p-n*-диода, требующая имплантации примеси под углом к прямоугольному гребню волновода. Целью данной работы является решение проблемы формирования управляющего *p-n*-диода модулятора за счёт изменения формы волновода при использовании технологии локального окисления кремния. Показано, что такой подход обеспечивает возможность сохранения стандартной (планарной) имплантации при формировании горизонтальной и вертикальной областей комбинированного управляющего *p-n*-диода и таких преимуществ окисления (по сравнению с ПХТ), как контролируемость

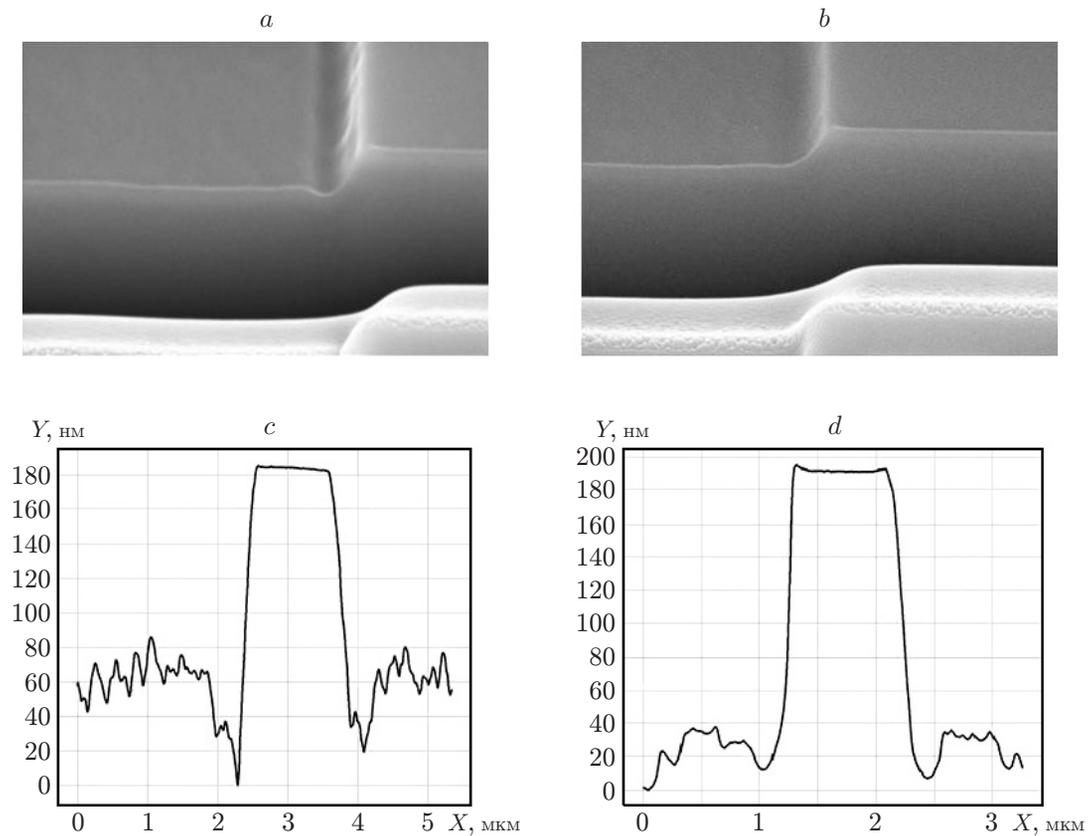


Рис. 2. СЭМ-изображения и АСМ-профили волноводов, сформированных методом ПХТ: до (а, с) и после (b, d) термического окисления с удалением слоя кремния 200 нм

и воспроизводимость конструктивных параметров волновода и предельно низкие значения шероховатости его поверхности.

Эксперимент. В работе использовались пластины КНИ с толщиной отсечённого слоя кремния 500 нм и толщиной скрытого диэлектрика 2 мкм. Концентрация примеси (акцепторов) в КНИ составляла $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. На их основе с использованием оптической литографии были изготовлены интерферометры Маха — Цендера с длиной модулирующих p - n -диодов 1,5 и 2,25 мм. Гребенчатый волновод создавался методом локального окисления кремния. Распределение примесей в КНИ-волноводе при формировании управляющего диода моделировалось с помощью программного пакета TCAD Sentarius. Для сравнения применялось формирование волновода методом ПХТ в смеси $\text{SF}_6/\text{CFCl}_3$ с последующим окислением во влажном кислороде при 1000 °С.

Конструктивные параметры модуляторов (высота h_c и ширина W гребня волновода) контролировались методами атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с использованием среза волновода ионным пучком. Среднеквадратичная шероховатость поверхности S_q определялась методом АСМ. Оптические параметры контролировались на длине волны 1555,7 нм.

Результаты и обсуждение. На рис. 2 показаны СЭМ-изображения и АСМ-профили гребенчатого волновода после его формирования методом ПХТ и последующего термического окисления, используемого для сглаживания микрорельефа поверхности. Из рисунка понятны основные проблемы ПХТ: развитие микрорельефа, который может приводить к потерям (рассеянию) света и к уменьшению пробоя формируемого p - n -диода вблизи основания гребня волновода. Как видно на рис. 2, b, микрорельеф, формируемый стандартным

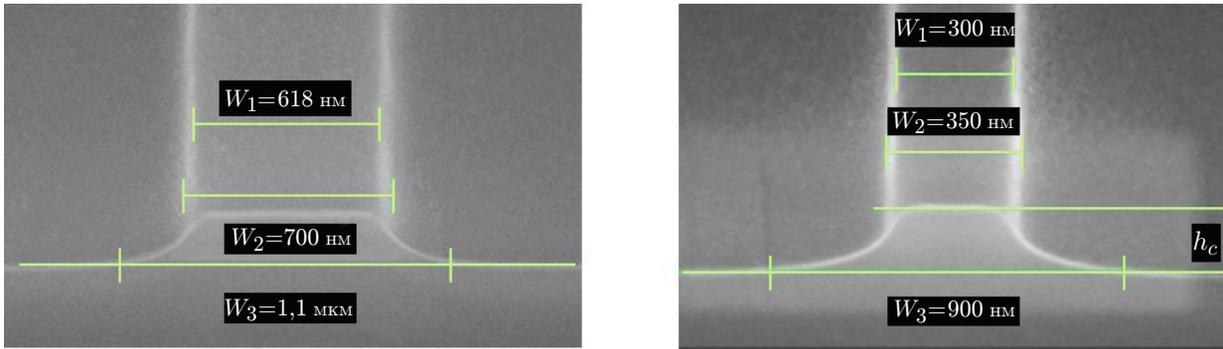


Рис. 3. СЭМ-изображения волноводов разной ширины, сформированных методом локального окисления кремния

Значения параметров W_2 , h_c и S_q в пяти точках волновода длиной 5 мм, сформированного локальным окислением

№ точки	W_2 , нм	h_c , нм	S_q , нм
1	495,9	147,7	0,10
2	501,3	145,8	0,10
3	508,3	146,0	0,12
4	506,5	147,9	0,09
5	506,8	144,0	0,18

ПХТ в $SF_6/CFCl_3$, остаётся существенным даже после удаления 200 нм Si-слоя термическим окислением. Кроме того, основной проблемой ПХТ является воспроизводимость глубины травления (высоты гребня волновода h_c), поскольку травление кремния проводится без стоп-слоя.

На рис. 3 приведены СЭМ-изображения волноводов, полученных при использовании локального окисления кремния. Здесь W_1 , W_2 и W_3 — ширина волновода на уровне высоты, полувысоты и основания гребня соответственно.

Таблица содержит значения параметров W_2 , h_c и среднеквадратичной шероховатости поверхности S_q , определённые в пяти различных точках волновода длиной 5 мм. Из рис. 3 и таблицы следует, что локальное окисление позволяет формировать волноводы различной ширины с хорошо воспроизводимыми конструктивными параметрами. Волноводы имеют форму сглаженной трапеции. Наклонные стенки с плавным переходом от гребня к основанию позволяют использовать стандартную планарную имплантацию примеси при формировании $p-n$ -диода в волноводе.

На рис. 4 представлены типичные вольт-амперные зависимости в модуляторе с длиной $p-n$ -диода 2,25 мкм. Справа показано распределение примеси в модуляторе, полученное моделированием в пакете TCAD. $P-n$ -диод в области гребня волновода p -типа проводимости создавался имплантацией фосфора с последующей активацией примеси. Видно, что форма волновода позволяет формировать в нём «плавный» модулирующий $p-n$ -диод (без характерных для ПХТ ямок травления вблизи гребня волновода, см. рис. 2), что обеспечивает достаточно большое напряжение пробоя ($\sim V_{bd} = -9$ В).

Кроме модулирующих $p-n$ -диодов ЭОМ содержит такие пассивные элементы, как делители светового потока на основе многомодовой интерференции с элементами волновода с изгибами для изменения направления распространения света.

На рис. 5 показаны оптические потери в тестовой структуре с изгибом волноводов радиусом 100 мкм (вставка). Легко оценить, что потери составляют $\sim 0,4$ дБ при поворо-

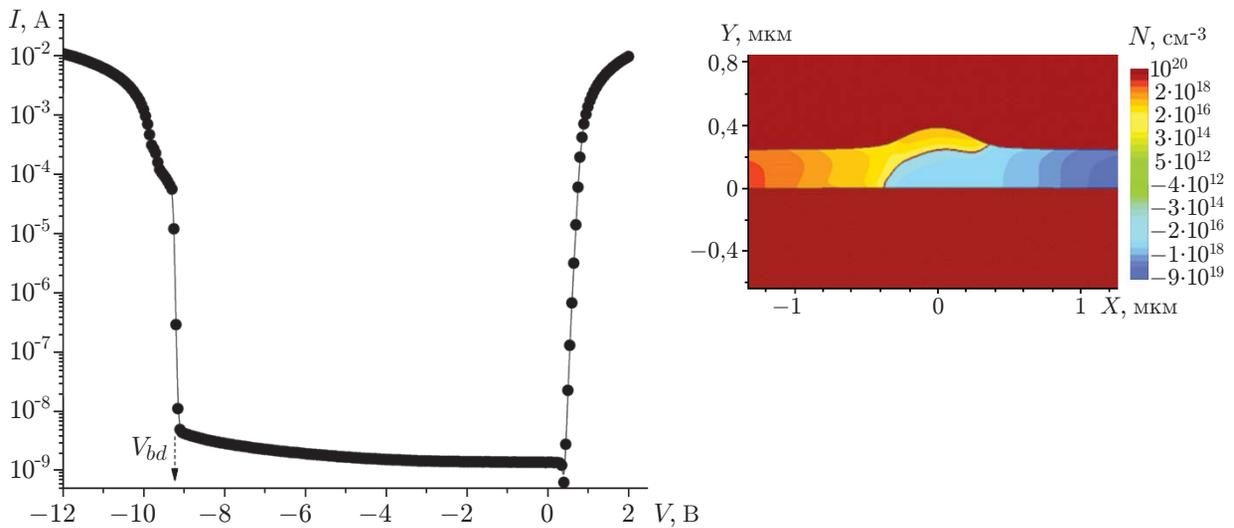


Рис. 4. Типичные вольт-амперные характеристики модулятора с модулирующим p - n -диодом длиной 2,25 мм. Справа показано распределение примеси в модуляторе

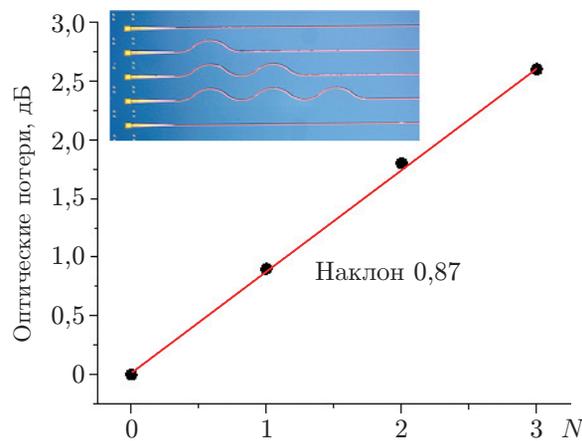


Рис. 5. Оптические потери в зависимости от числа тестовых элементов, обеспечивающих изменение в направлении распространения света. На вставке дано оптическое изображение фрагмента тестовой структуры с прямолинейными волноводами и радиусом изгиба 100 мкм

те волновода на 90° . Эксперимент также показал, что потери в элементах многомодовой интерференции (1×2) составляют $\sim(0,8-3,5)$ дБ/элемент. Как видно из таблицы, локальное окисление обеспечивает предельно минимальные значения шероховатости поверхности волновода. Поэтому наблюдаемые потери в пассивных элементах ЭОМ могут быть ограничены их латеральным микрорельефом, который определяется возможностями используемой (в нашем случае оптической) литографии, а также структурным совершенством КНИ.

Рис. 6 показывает изменение мощности светового потока на выходе модуляторов $\Delta P_{out} = P_{out}(V) - P_{out}(0)$ в зависимости от напряжения V на управляющем p - n -диоде (см. рис. 4, б) в режиме инжекции. За нулевое значение принято значение P_{out} при напряжении на управляющем p - n -диоде $V = 0$ В. Видно, что при увеличении управляющего напряжения на p - n -диодах до 3 В уменьшение мощности светового потока модуляторов достигает 8–12 дБ. Поскольку для такого типа приборов важен уровень затухания оп-

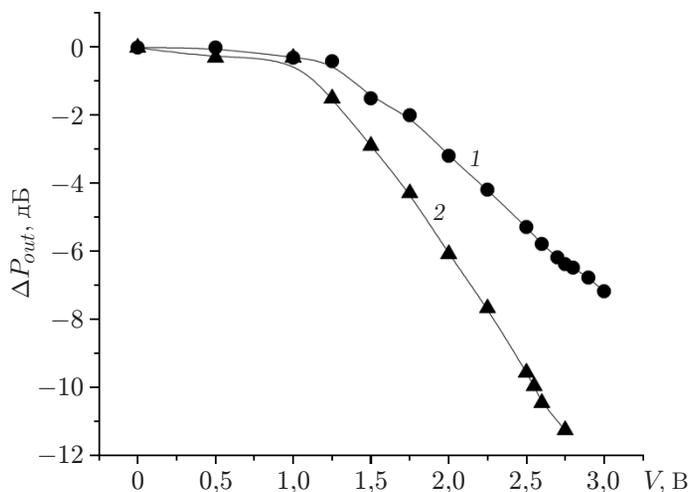


Рис. 6. Изменение мощности выходного сигнала модуляторов в зависимости от напряжения на управляющих p - n -диодах различной длины (1 — 1,5 мм, 2 — 2,25 мм)

тического сигнала 3 дБ [1–4], то полученного значения вполне достаточно для перевода модулятора из состояния ВКЛ в состояние ВЫКЛ.

Заключение. Полученные в работе результаты показывают, что стандартный для кремниевой технологии процесс локального окисления может быть успешно применён при формировании кремниевых ЭОМ на основе p - n -диодов комбинированной конструкции. Он обеспечивает хорошую воспроизводимость конструктивно-технологических параметров ЭОМ, предельно низкие значения шероховатости поверхности (0,1–0,2 нм), формирование модулирующего p - n -диода с высоким значением напряжения пробоя (~ 9 В).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58117X0026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reed G. T., Mashanovich G. Z., Gardes F. Y. Recent breakthroughs in carrier depletion based silicon optical modulators // *Nanophotonics*. 2014. **3**, N 4–5. P. 229–245.
2. **Enabling** Technologies for High Spectral-Efficiency Coherent Optical Communication Networks /Eds. X. Zhou, Ch. Xie. New Jersey: John Wiley & Sons, 2016. 622 p. Ch. 13: Photonic integration /P. Dong, S. Chandrasekhar. P. 447–472.
3. Reed G. T., Knights A. P. *Silicon Photonics: An Introduction*. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 276 p.
4. Kim G., Park J. W., Kim I. G. et al. Compact-sized high-modulation-efficiency silicon Mach — Zehnder modulator based on a vertically dipped depletion junction phase shifter for chip-level integration // *Opt. Lett.* 2014. **39**, Is. 8. P. 2310–2313.
5. Gardes F. Y., Brimont A., Sanchis P. et al. High-speed modulation of a compact silicon ring resonator based on a reverse-biased pn diode // *Opt. Express*. 2009. **17**, Is. 24. P. 21986–21991.
6. Gardes F. Y., Thomson D. J., Emerson N. G., Reed G. T. 40 Gb/s silicon photonics modulator for TE and TM polarisations // *Opt. Express*. 2011. **19**, Is. 12. P. 11804–11814.

Поступила в редакцию 21.06.2019

После доработки 10.07.2019

Принята к публикации 07.08.2019