

# Новый тип гетерогенных нанопотонных оптических волноводов на основе структур кремний-на-изоляторе

А.В.Царев

*Предлагается и исследуется новый тип оптических волноводов в наноразмерных структурах кремний-на-изоляторе (КНИ). Их оптические свойства обсуждаются на основе результатов численного моделирования методом распространяющихся пучков (ВРМ). Новый дизайн в виде гетерогенных волноводных структур основан на создании по краям многомодового полоскового волновода (сечение кремниевой сердцевины  $\sim 200$  нм  $\times$  16 мкм) дополнительных сильно легированных  $p^+$ -областей. Такое легирование обеспечивает «одномодовое» поведение гетерогенного волновода благодаря снижению оптических потерь фундаментальной моды и увеличению потерь мод более высокого порядка. Одномодовые гетерогенные волноводы могут являться базовыми для создания различных фотонных и интегрально-оптических элементов.*

**Ключевые слова:** интегральная оптика, оптический волновод, оптические потери, кремний-на-изоляторе.

Оптические волноводы на основе тонких (наноразмерных) структур кремний-на-изоляторе (КНИ) широко используются при создании различных фотонных элементов [1], технология изготовления которых может быть совместима со стандартной полупроводниковой КМОП\*-технологией. Из-за высокого контраста показателей преломления сердцевины из кремния ( $n = 3.478$ ) и окружающего оксида ( $n = 1.447$ ) одномодовые волноводы на КНИ имеют сердцевину субмикронных размеров и сравнительно высокие потери [1].

Технология изготовления тонких волноводов на КНИ совместима с технологией изготовления фотонных кристаллов, которую можно использовать для создания двумерных дифракционных решеток [2] для ввода света по нормали из оптоволокна в нановолноводы. Однако высокий контраст показателя преломления приводит к невозможности выполнить одновременно взаимоисключающие требования, накладываемые на оптимальные геометрические размеры кремниевой сердцевины волновода. Для снижения паразитных сигналов волновод должен быть одномодовым, т. е. иметь субмикронные размеры. В перпендикулярном оси волновода направлении это условие выполняется за счет оптимальной толщины ( $\sim 220$  нм) высококачественного слоя кремния. В то же время ширина таких полосковых волноводов должна быть достаточно велика (больше 10 мкм), чтобы обеспечить приемлемое согласование с волоконным световодом, и, следовательно, они обязательно являются многомодовыми, содержащими десятки мод.

В настоящей работе описываются новые гетерогенные волноводы на КНИ, которые имеют большие поперечные размеры и при этом являются одномодовыми.

Новый дизайн волноводных структур основан на создании по краям многомодового полоскового волновода (сечение кремниевой сердцевины  $\sim 200$  нм  $\times$  16 мкм) дополнительных сильно легированных  $p^+$ -областей. Такое легирование обеспечивает одномодовое поведение двойного волновода благодаря снижению оптических потерь для фундаментальной моды и увеличению потерь для мод более высокого порядка.

Действительно, из формул, приведенных в работе [3], можно получить простое эмпирическое соотношение между достигаемым изменением реальной части показателя преломления ( $\Delta n$ ) и возникающим при этом дополнительным поглощением ( $\Delta \alpha$ ) на свободных носителях заряда. Для длины волны  $\lambda_0 = 1.55$  мкм в кремнии это соотношение для электронов и дырок приобретает вид

$$\Delta \alpha_e = 0.12 |\Delta n_e|, \quad \Delta N_e = 1.14 \times 10^{21} |\Delta n_e|, \quad (1)$$

$$\Delta \alpha_h = 0.16 |\Delta n_h|^{5/4}, \quad \Delta N_h = 2.18 \times 10^{21} |\Delta n_h|^{5/4},$$

где  $\Delta N_h$  и  $\Delta N_e$  – объемные концентрации дырок и электронов соответственно;  $\Delta \alpha_{e,h}$  измеряются в  $\text{см}^{-1}$ , а  $\Delta N_{e,h}$  – в  $\text{см}^{-3}$ .

Из выражений (1) легко видеть, что при  $\Delta n_{e,h} < 0.3$  управление оптическими свойствами кремния с помощью свободных дырок является более предпочтительным, т. к. как оно обеспечивает одинаковое изменение показателей преломления  $\Delta n_{e,h}$  при меньших дополнительных потерях. Далее мы предлагаем использовать  $p^+$ -области для локального управления оптическими свойствами тонких КНИ-волноводов.

Рассмотрим полосковый волновод на основе КНИ шириной  $W + 2W_g$ , на краях которого имеются сильнолегированные  $p^+$ -области шириной  $W_g$ , где за счет дисперсии на свободных носителях заряда показатель преломления меньше, чем в сердцевине волновода. Тем самым формируется гетерогенный оптический волновод (рис.1), в котором к многомодовому сильноконтрастному волноводу (кремний – окисел) добавлен слабоконтрастный волновод. Выбрав  $|\Delta n_h| \sim 0.002$  ( $\Delta N_h \sim 9.2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , см. (1)), легко добиться того, чтобы основная доля

\*КМОП – комплементарный металл – окисел – полупроводник.

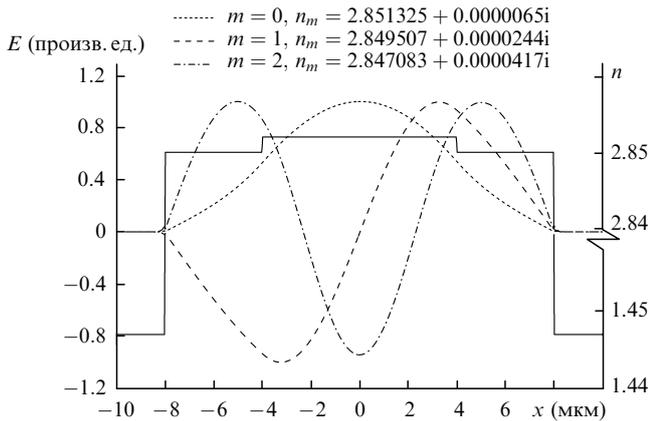


Рис.1. Распределение действительной части показателя преломления  $n$  (сплошная кривая) и оптических полей  $E$  первых трех мод для гетерогенных полосковых волноводов на тонких слоях КНИ при  $W = 8$  мкм,  $W_g = 4$  мкм ( $m$  – номер моды). Расчет выполнен двумерным методом BPM.

энергии поля фундаментальной моды была сконцентрирована в центральной области волновода шириной  $W$ , а на диссипативную область с носителями заряда приходилась только ее незначительная часть. Оптические поля всех других мод, эффективные показатели которых близки к показателю преломления в легированной области или меньше него, занимают все сечение волновода. Следовательно, доля энергии, приходящаяся на диссипативную область, многократно возрастает (рис.1) и наблюдается значительное дополнительное затухание оптических мод на свободных носителях заряда, которое растет с номером моды.

Эти общие положения подтверждены прямыми расчетами методом распространяющихся пучков (beam propagation method (BPM)), реализованным в коммерческой программе VeamPROP [4]. В частности, на рис.2 приведены зависимости дополнительных оптических потерь на свободных носителях заряда (дырках) от ширины легирующих областей  $W_g$  для трех первых волноводных мод в гетерогенных оптических волноводах на КНИ. Хорошо видно, что при ширине  $W_g \sim 2 - 8$  мкм обеспечи-

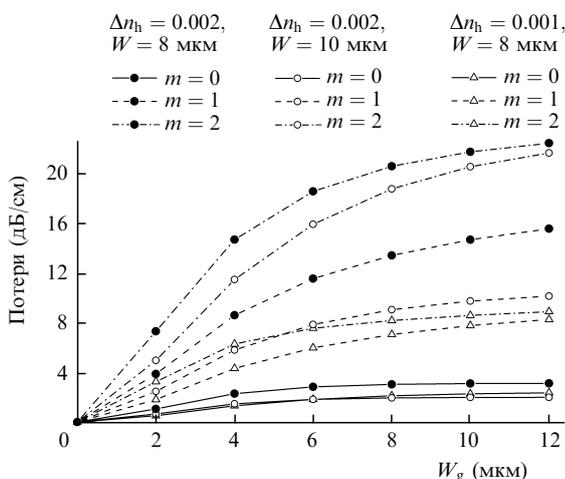


Рис.2. Дополнительные оптические потери на свободных носителях заряда (дырках) в гетерогенных полосковых оптических волноводах для различных волноводных мод как функция ширины легирующих областей  $W_g$  для  $W = 8$  и  $10$  мкм,  $\Delta n_h = 0.002$  и  $0.001$ . Расчет выполнен двумерным методом BPM.

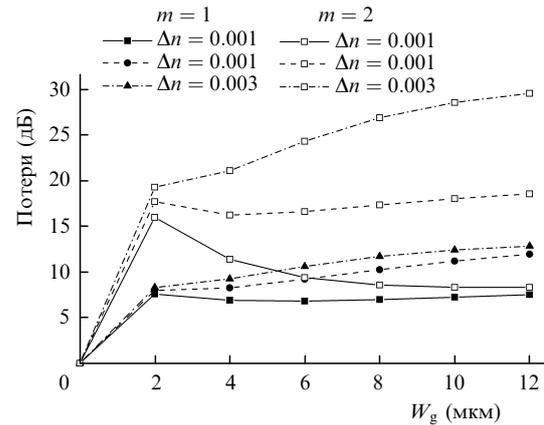


Рис.3. Зависимости от ширины легирующих областей  $W_g$  дополнительных потерь на свободных носителях заряда (дырках) первой и второй волноводных мод при их распространении вдоль гетерогенного оптического волновода характеристической длины, соответствующей оптическим потерям  $-3$  дБ для фундаментальной моды. Расчет выполнен двумерным методом BPM.

вается эффективная селекция фундаментальной моды по сравнению с модами более высокого порядка (см. также рис.3). Следовательно, гетерогенный волновод с кремниевой сердцевинной сечением  $\sim 200$  нм  $\times$   $16$  мкм можно сделать одномодовым с оптическими потерями  $\sim 1 - 3$  дБ/см. Дополнительное преимущество гетерогенного волновода заключается в слабой зависимости оптических потерь от уровня шероховатости его боковых границ. Это обусловлено как большой шириной гетерогенного одномодового волновода, так и тем, что поле фундаментальной моды изолировано от источников рассеяния с помощью  $p^+$ -областей. Поэтому оптические потери гетерогенного волновода ниже, чем у стандартного одномодового волновода на КНИ меньшего сечения ( $220 \times 500$  нм), изготовленного по той же технологии КМОП [1].

Таким образом, в настоящей работе предложен и исследован методом BPM новый тип нанопотоных оптических волноводных структур на основе КНИ. Эти структуры представляют собой гетерогенные оптические волноводы, имеющие сильнолегированные  $p^+$ -области по краям кремниевой сердцевины (в виде полоски размером  $\sim 200$  нм  $\times$   $16$  мкм в окружении окиси кремния). Дополнительное легирование обеспечивает «одномодовое» поведение гетерогенного волновода благодаря снижению оптических потерь фундаментальной моды и увеличению потерь мод более высокого порядка (вследствие разного затухания оптических мод на свободных носителях заряда и на рассеивающих границах волновода). Гетерогенные волноводы могут найти применение в кремниевой нанофотонике.

Автор выражает благодарность компании RSoft Design Group Inc. за предоставление лицензии и поддержку программного пакета VeamPROP [4]. Работа выполнена при поддержке инновационного гранта РФФИ № 05-02-08118-офи-а.

1. Bogaerts W., Baets R., Dumon P., Wiaux V., Beckx S., Taillaert D., Luyssaert B., Campenhout J.V., Bienstman P., Thourhout D.V. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **23**, 401 (2005).
2. Taillaert D., Chong H., Borel P., Frandsen L., De La Rue R., Baets R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **15**, 1249 (2003).
3. Soref R.A., Bennett B.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **23**, 123 (1987).
4. www.rsoftdesign.com.