

06;07

Потери на распространение света в изогнутых интегральных волноводах на основе окисленного пористого кремния

© В.П. Бондаренко, А.А. Клышко, М. Балукани, А. Феррари

Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, Минск
E-mail: vitally@bsuir.edu.by.

Римский Университет „La Sapienza“, Рим, Италия

Поступило в Редакцию 13 октября 2004 г.

Впервые оценены потери на распространение света в изогнутых интегральных волноводах на основе окисленного пористого кремния. Установлено, что в видимом диапазоне на красном свете потери снижаются от 20 до 5 dB на 90° изгиба при увеличении радиуса кривизны от 125 до $2500\mu\text{m}$ при потерях на прямолинейных участках волноводов 0.4 dB/cm. Показано, что основной составляющей потерь на изгиб в волноводах являются потери на переходе от прямой части к изогнутой. Дополнительные потери вносят области непрокисленного пористого кремния на боковых стенках изогнутых участков волноводов.

Интегральные волноводы на основе окисленного пористого кремния были разработаны в 1992 г. [1]. При достижении низкого уровня потерь такие волноводы могут быть использованы в интегральных оптоэлектронных схемах, кремниевых оптических платформах, сенсорных устройствах. Первые образцы волноводов на основе окисленного пористого кремния имели потери порядка единиц dB/cm в видимом диапазоне спектра [2]. Изучению таких волноводов посвящено несколько работ [3–6]. Благодаря оптимизации технологии, потери на распространение света в прямолинейных волноводах были значительно снижены (до 0.4–0.5 dB/cm в видимом диапазоне [7]). Для успешного применения интегральные волноводы должны иметь не только прямолинейные участки, но и изогнутые.

В настоящей работе сообщается об изготовлении изогнутых волноводов на основе окисленного пористого кремния и впервые оценены потери в них.

Для изготовления волноводов был использован модифицированный вариант процесса, описанного в [7]. В качестве исходных были использованы пластины кремния КЭС-0.01 ориентации (100). Пластины были очищены в перекисно-соляном растворе, и в приповерхностную область пластин была проведена имплантация ионов сурьмы с энергией 60 keV и дозой $250 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ с целью подавления отрицательного влияния свирль-дефектов на свойства волноводов [8]. После имплантации пластины снова химически очищались и подвергались окислению в сухом кислороде при 1220°C для активации ионов сурьмы и формирования пленки SiO_2 толщиной $0.5 \mu\text{m}$. При помощи фотолитографии и плазменного травления в окисной пленке создавался рисунок будущих волноводных структур. Ширина окна маски составляла $7 \mu\text{m}$. Через окна маски производилось селективное анодирование кремния в электролите, содержащем 48% HF и этиленгликоль в отношении 2:3. Для формирования сердцевины волновода и буферного слоя использовалось двухстадийное анодирование ($40 \text{ mA}/\text{cm}^2$ в течение 4 min и $80 \text{ mA}/\text{cm}^2$ в течение 45 s). Заключительным этапом формирования волноводов являлось трехстадийное термическое окисление [7]. Толщина волноводного слоя составляла $7.5 \mu\text{m}$, буферного слоя — $2.5 \mu\text{m}$. Ширина волновода составляла $22 \mu\text{m}$. Значения показателей преломления сердцевины и буферного слоя были равны соответственно 1.4575 и 1.4460. Разница показателей преломления составила 0.78%.

Для измерения потерь на изгиб были изготовлены образцы тестовой матрицы волноводов. Кристалл матрицы содержал 20 волноводов. Каждый волновод имел изгиб, равный 90° . Радиусы изгиба волноводов изменялись от 125 до $2500 \mu\text{m}$ с шагом $125 \mu\text{m}$. На тестовом кристалле был также сформирован один прямолинейный волновод.

Измерение потерь на изгиб проводилось с использованием оригинальной методики ввода света посредством зеркал, самоформирующихся на концах волноводов в процессе анодирования и окисления [9]. Свет от He–Ne-лазера поочередно вводился в каждый волновод, начиная с прямолинейного, и измерялась мощность оптического излучения, выходящая с торца волновода, расположенного на зеркальном сколе. Все волноводы в тестовой матрице различались лишь длиной и радиусом изогнутого участка, и поэтому потери на изгиб можно было определить сравнением измеренных мощностей сигналов.

Результаты измерений потерь для 20 волноводов с различным радиусом изгиба приведены на рис. 1. Зависимость потерь от радиуса

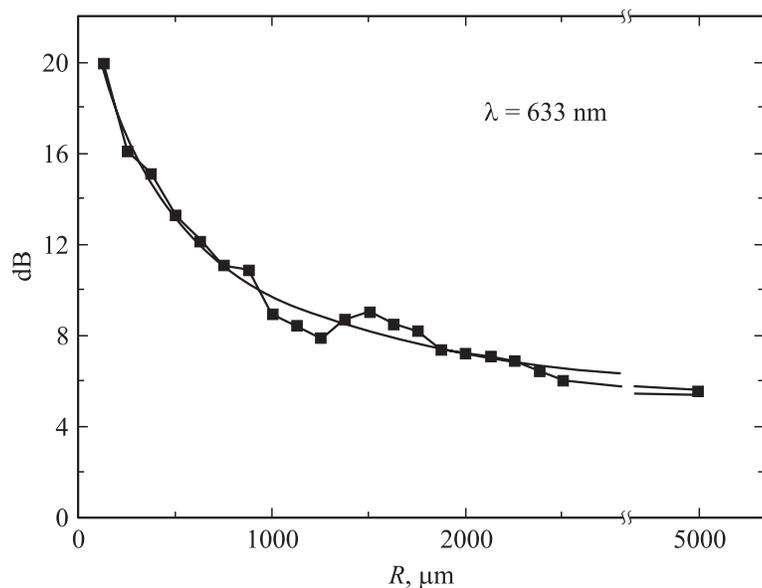


Рис. 1. Зависимость потерь от радиуса изгиба волновода.

изгиба имеет экспоненциальный характер; потери составляют 6 dB при радиусе $2500 \mu\text{m}$ и достигают 20 dB на поворот при малых радиусах изгиба. Потери на прямолинейных участках не превышали 0.4 dB/cm на красном свете, при этом волноводы демонстрировали многомодовый режим работы.

Известно, что в диэлектрических волноводах на основе окиси кремния, с низким скачком показателя преломления, удержание света в сердцевине волновода обеспечивается полным внутренним отражением, а изгиб волновода может приводить к сильным радиационным потерям. Как показано в [10], потери на изогнутой части волноводов складываются из двух основных составляющих: потерь на стыке и радиационных потерь в изогнутой части. Таким образом, данные, приведенные на рис. 1, включают в себя удвоенные потери на стыке (переход от прямолинейной части к изогнутой) и собственно потери на изогнутую часть волновода протяженностью 90° .

Для оценки потерь на стык служит коэффициент конверсии мощности c^2 , характеризующий передачу мощности основной волноводной моды модам более высокого порядка [10]. Для многомодовых волноводов

$$c^2 = \left(\frac{\pi n_0 a^3}{\lambda^2 R} \right)^2,$$

где n_0 — коэффициент преломления сердцевины волновода, a — ее ширина, R — радиус изгиба волновода.

Значения c^2 , значительно превышающие 1, свидетельствуют о высоких потерях именно на стыках. Для изготовленных нами волноводов коэффициент c^2 велик по причине большой ширины волновода по сравнению с радиусом изгиба и длиной волны. Например, для радиуса $2500 \mu\text{m}$ величина c^2 составляет почти 21 и значительно возрастает с увеличением кривизны изгиба. Что касается потерь на изгиб, то они весьма малы, даже в случае, когда c^2 намного больше 1. Даже учитывая высокие значения c^2 , потери в изготовленных нами образцах оказались выше, чем ожидалось. Например, в волноводах на основе оксида кремния, имеющих ширину $6 \mu\text{m}$, толщину $6 \mu\text{m}$ и разницу в показателях преломления 0.75% [11], потери составляли менее 0.1 dB при радиусе изгиба $5000 \mu\text{m}$. Полагая, что зависимость потерь от радиуса экспоненциальная, и экстраполируя экспериментальную кривую до радиусов более $10\,000 \mu\text{m}$, выйти на уровень менее 4 dB на поворот 90° не удалось. Это свидетельствует о наличии дополнительных источников потерь в изготовленных нами изогнутых волноводах.

Визуальное изучение волноводов позволило выявить причину дополнительных потерь на изогнутой части. На рис. 2, *a* представлена микрофотография волновода с радиусом изгиба $125 \mu\text{m}$. На боковых стенках волновода заметны темные полосы с неоднородной структурой. Анализ сколов образцов позволил установить, что эти полосы представляют собой области непрокисленного пористого кремния. На рис. 2, *b* и *c* представлены схематические рисунки поперечного сечения сколов волновода. Как видно из рисунков, области непрокисления расположены на боковых стенках волновода и частично заходят в область буферного слоя. Известно, что в прямолинейных волноводах свет удерживается преимущественно в сердцевине, в то время как в изогнутых участках большую роль в распространении света начинает играть именно качество боковых стенок. Наличие непрокисленного пористого кремния приводит к неровностям боковых стенок и дополнительному рассеянию

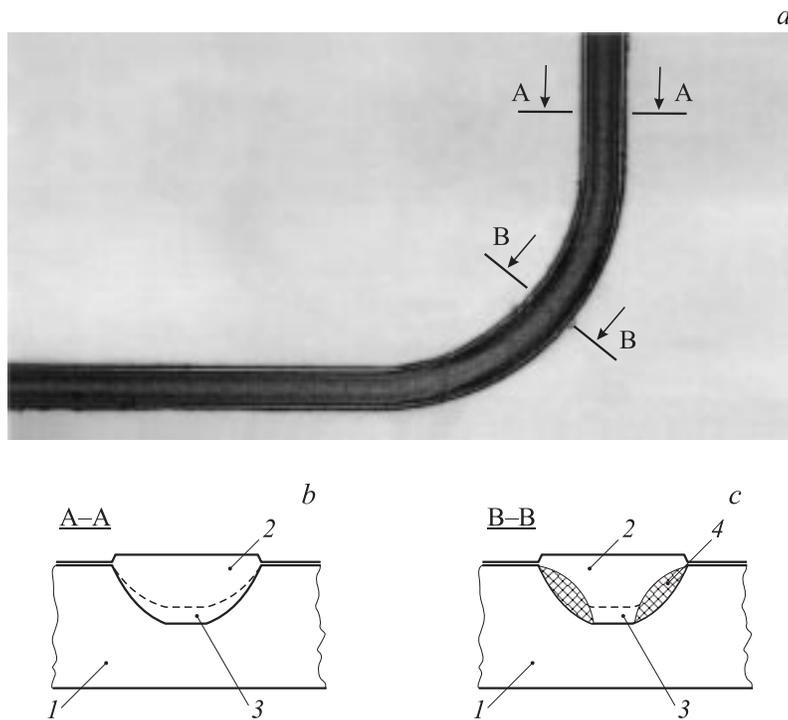


Рис. 2. Микрофотография волновода с радиусом изгиба $125\mu\text{m}$ (a) и схематические рисунки поперечных сколов прямолинейного (b) и изогнутого (c) участка: 1 — кремниевая подложка; 2 — сердцевина волновода; 3 — буферный слой; 4 — непрокисленный пористый кремний.

света. Мы полагаем, что причиной неполного окисления является локальное изменение его свойств. Действительно, в процессе анодирования через окна в маске одновременно с образованием пористого кремния в глубь подложки происходит латеральное анодирование под маску. При этом если процесс анодирования кремния хорошо отработан для ориентаций кремния на прямолинейных участках, то при изменении ориентации (как происходит на изгибе) формируются области пористого кремния с другой пористостью, которые при последующем окислении не окисляются полностью.

Представленные результаты демонстрируют потенциальную возможность создания из окисленного пористого кремния изогнутых интегральных волноводов. Для дальнейшего снижения потерь в таких волноводах необходимо исключить область непрокисленного пористого кремния. Увеличение скачка показателя преломления (введением, например, примеси Ti в сердцевину волновода) должно привести к лучшему удержанию света в сердцевине волновода и также к снижению потерь на изгиб.

Список литературы

- [1] *Bondarenko V., Varichenko V., Dorofeev A. et al. // Tech. Phys. Lett. 1993. V. 19. P. 463–465.*
- [2] *Bondarenko V., Dorofeev A., Kazuchits N. // Microelectron. Engineering. 1995. V. 28. P. 447–450.*
- [3] *Maiello G., Monica S., Ferrari A. et al. // Thin Solid Films. 1997. V. 297. P. 311–313.*
- [4] *Takahashi M., Koshida N. // J. Appl. Phys. 1999. V. 86. P. 5274–5278.*
- [5] *Benson T., Arrand H., Sewell P. et al. // Materials Science and Engineering. 1999. B69–70. P. 92–99.*
- [6] *Vorozov N., Dolgyi L., Yakovtseva V. et al. // Electronics Letters. 2000. V. 36. P. 722.*
- [7] *Balucani M., Bondarenko V., Vorozov N., Ferrari A. // Physica E. 2003. V. 16. P. 574–579.*
- [8] *Balucani M., Bondarenko V., Vorozov N., Ferrari A. // Physica E. 2003. V. 16. P. 586–590.*
- [9] *Balucani M., Bondarenko V., Dolgyi L. et al. // Materials Science in Semiconductor Processing. 2000. V. 3. P. 351–355.*
- [10] *Marcatili E.A.J. // Bell Syst. Tech. J. 1969. V. 48. P. 2103.*
- [11] *Kawachi M. // Optical and Quantum Electronics. 1990. V. 22. P. 391–416.*