

06.3
©1993

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД НА ОСНОВЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

*В.П.Бондаренко, В.С.Вариченко,
А.М.Дорофеев, Н.М.Казюциц, В.А.Лабунюв,
В.Ф.Стельмах*

Пористый кремний был впервые получен в конце 50-х годов при исследовании процесса электрополировки кремния во фтористоводородной кислоте [1]. Этот материал представляет собой слой монокристаллического кремния, пронизанный огромным количеством микроскопических пор, обеспечивающих развитую эффективную поверхность, и в то же время сохраняющий кристаллическую структуру исходного монокристалла [2-4].

Сегодняшний интерес к пористому кремнию с обнаружением в нем интенсивной фотолюминесценции в видимой области спектра [5]. Как известно, кремний — непрямозонный полупроводник с шириной запрещенной зоны 1.1 эВ, что обуславливает слабую фотолюминесценцию в ближней ИК-области. Лавина публикаций, последовавшая за сообщением [5], пока еще не дала ответа, почему тот же кремний, но в пористом состоянии, эффективно излучает в видимой области. Однако уже установлены многие закономерности не только фото-, но и электролюминесценции, при которой пропускание тока через пористый кремний сопровождается излучением видимого света [6-8].

Практическая важность этого явления понятна, поскольку оно открывает перспективы интеграции оптоэлектронных устройств на базе хорошо отработанной кремниевой технологии. В таких устройствах, кроме излучателей и приемников световых сигналов, необходимо наличие микроминиатюрных оптических соединителей-световодов, обеспечивающих передачу и обработку оптических сигналов внутри микросхемы [9].

В настоящей работе сообщается об эффекте волноводного распространения света в окисленном пористом кремнии и показана возможность создания на его основе планарного световода для оптоэлектронных интегральных схем.

Исходными образцами служили пластины монокристаллического кремния с ориентацией (111), легированные бором до концентрации $2.5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В качестве маски при анодной обработке использовали пленку нитрита кремния, в которой фотолитографически формировали окна с топологией планарного световода-симметричного разветвителя длиной 15 мм.

Анодную обработку пластин проводили в электролите на основе фтористоводородной кислоты при плотностях тока 5-20 мА/см², формируя в окнах локальные области пористого кремния толщиной 5-15 мкм. При последующем термическом окислении во влаж-

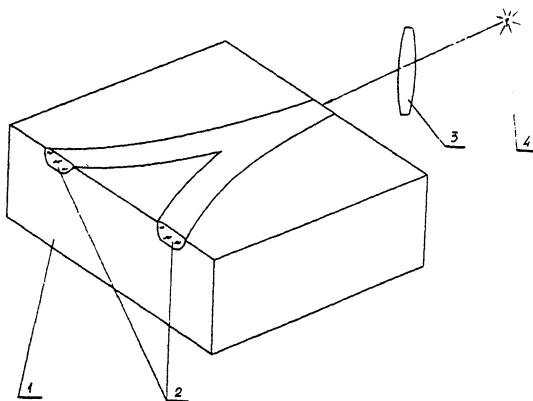


Рис. 1. Схема наблюдения волноводного распространения света в симметричном разветвителе на основе пористого кремния. 1 — пластина кремния, 2 — световод, 3 — линза, 4 — источник света.

ном кислороде при температуре 1050°C на поверхности кремниевой пластины формировалась пленка SiO_2 толщиной $0.45\ \mu\text{м}$, а пористый кремний, имеющий развитую эффективную поверхность, окислялся на всю глубину. При окислении кремния происходит увеличение объема окисла в полтора раза, но в случае пористого кремния образующийся окисел расширялся в объем пор, что приводило к формированию монолитного оксидного канала, “встроенного” в кремний.

Изменение режимов анодной обработки позволяло варьировать оптические свойства пористого кремния и сформированного из него диэлектрического световода. Следует отметить, что несмотря на значительную (до $15\ \mu\text{м}$) толщину слоя окисленного пористого кремния, полученная структура не имела трещин, дислокационных линий скольжения и других дефектов, обусловленных высокими механическими напряжениями и ухудшающих оптические свойства световода. Для оценки работоспособности световода на его вход направляли излучение лампы накаливания или Ht-Ne лазера ($\lambda = 632.8\ \text{нм}$), которое наблюдали визуальным способом на выходах разветвителя (рис. 1).

На рис. 2 представлены микрофотографии поперечного сечения кремниевой пластины со сформированным световодом, “встроенным” в объем кремния. Как видно из рис. 2, свет распространяется в центральной зоне поперечного сечения световода. Периферийная часть световода имеет другой (меньший) показатель преломления и играет роль буферного слоя, предотвращающего уход света в кремниевую подложку. Как известно [9], для волноводного распространения света необходимо, чтобы коэффициент преломления n_w материала волновода был больше коэффициента преломления n_s материала подложки, в противном случае излучение уходит в подложку и там поглощается. Кремний имеет высокий коэффициент преломления ($n_{\text{Si}} = 3.85$ при $\lambda = 0.63\ \mu\text{м}$), что не позволяет наносить оптический волновод непосредственно на его

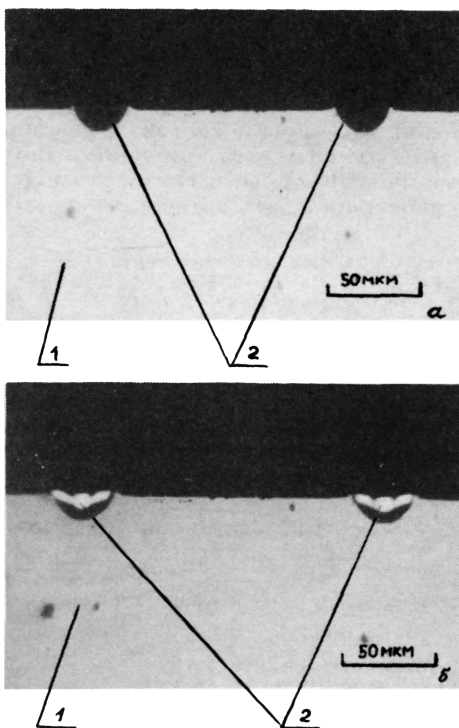


Рис. 2. Поперечный срез кремниевой пластины с волноводом-разветвителем на основе пористого кремния. а — источник света выключен, б — источник света включен, 1 — пластина кремния, 2 — световод.

поверхность. Поэтому волновод отделяется от кремниевой подложки буферным слоем с показателем преломления $n_b < n_w$. Такие структуры обеспечивают волноводное распространение света, однако их технология [9,10] достаточно сложна.

В нашем случае буферный слой SiO_2 формировался одновременно с созданием световодного слоя при термическом окислении пористого кремния за счет того, что окислитель беспрепятственно проникал на границу раздела Si — пористый кремний. Параметры волноводного и буферного слоев задавались режимом анодной обработки при формировании пористого кремния и режимом последующего окисления так, чтобы центральная часть световода имела больший показатель преломления, чем его периферия.

В настоящей работе показана возможность создания “встроенного” в кремний световода, процесс изготовления которого проще известных [9,10] и хорошо совместим с кремниевой технологией. Следует отметить, что путем выбора режимов анодной обработки могут быть избирательно переведены в пористое состояние не только поверхностные, но и “скрытые” слои кремния определенного уровня легирования и типа проводимости [2,3]. Последующее

окисление пористого кремния обеспечивает формирование оптических волноводов, "скрытых" в объеме кремниевой пластины.

Возможность изготовления на основе пористого кремния интегрально-оптических волноводов, наряду с формированием в рамках кремниевой технологии светоизлучающих и фотоприемных структур, позволяет создать принципиально новую элементную базу для оптических средств связи, устройств отображения информации и сверхскоростных оптоэлектронных компьютеров.

Список литературы

- [1] *Turner D.R.* // J. Electrochem. Soc. 1958. V. 105. N 7. P. 402-408.
- [2] *Лабунюв В.А., Бондаренко В.П., Борисенко В.Е.* // Зарубежная электронная техника. 1978. Вып. 15. С. 3-48.
- [3] *Бондаренко В.П., Борисенко В.Е., Глиненко Л.К., Райко В.А.* // Зарубежная электронная техника. 1989. Вып. 9. С. 55-84.
- [4] *Smith R.L., Collins S.D.* // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. N. 8. P. R1-R22.
- [5] *Canham L.T.* // Appl. Phys. Lett. 1990. V. 57. N 10. P. 1046-1048.
- [6] *Koshida N., Kouyama H.* // Optoelectronics-Devices and Technologies. 1992. V. 7. N 1. P. 103-115.
- [7] *Старухин А.Н., Лебедев А.А., Разбирин Б.С., Капитонова Л.М.,* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 16. С. 60-63.
- [8] *Кузнецов С.Н., Березин Л.Я., Стефанович Г.Б.* // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 22. С. 72-75.
- [9] *Волноводная оптоэлектроника.* // Под ред. Тамира Т. М.: Мир, 1991. 575 с.
- [10] *Selvaraj R., Lin H.T. and McDonald J.F.* // J. Lightwave Tech. 1988. V. 6. N 6. P. 1034-1044.

Минский радиотехнический институт,
Белорусский государственный университет

Поступило в Редакцию
19 апреля 1993 г.