

06;07;12

Легированный эрбием окисленный пористый кремний для интегральных оптических волноводов

© В.П. Бондаренко, В.А. Яковцева, Л.Н. Долгий,
Н.Н. Ворозов, Н.М. Казючиц, Л. Цыбесков, Ф. Фуше

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, Минск
Белорусский государственный университет, Минск
Рочестерский университет, Рочестер, штат Нью-Йорк 14626, США

Поступило в Редакцию 12 апреля 1999 г.

Впервые показано, что электрохимическое введение эрбия в состав волноводных структур на основе окисленного пористого кремния не только сохраняет их волноводные свойства, но и открывает перспективы создания активных волноводных приборов на их основе. Установлено, что эрбий в волноводе находится в оптически активном состоянии и наиболее эффективно возбуждает ионы эрбия светом с длиной волны 381 и 523 nm.

В [1] показана возможность создания интегральных оптических волноводов на основе окисленного пористого кремния (ПК). Процесс их изготовления хорошо совместим с традиционной кремниевой технологией и состоит в формировании локальных слоев ПК с их последующим термическим окислением. Все разработанные к настоящему времени волноводы на основе окисленного ПК [1–6] являются пассивными приборами. Активные волноводные приборы могут быть получены путем введения в канал волновода оптически активных примесей. Среди них особый интерес представляет эрбий, так как его основная полоса излучения с длиной волны 1532 nm соответствует минимуму потерь кварцевой волоконной оптики [7]. В настоящей работе для введения ионов эрбия в состав окисленного ПК использовали электрохимический метод осаждения эрбийсодержащего материала в слои ПК с последующим термическим окислением полученных структур.

В работе использовали (111) пластины кремния p -типа с удельным сопротивлением $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$. Локальные области ПК формировали

анодированием в 24%-ном растворе плавиковой кислоты при плотности тока 20 mA/cm^2 через маску нитрида кремния. Эрбий вводили катодной обработкой в спиртовом растворе $0.1 \text{ M Er(NO}_3)_3$ при плотности тока 0.1 mA/cm^2 в течение 30 min. Затем проводили термообработку образцов последовательно 1 h в кислороде при 300°C , 30 min в паре при 1000°C , 30 min в аргоне при 1150°C .

Спектроскопические исследования проводили на образцах окисленного ПК площадью 3 cm^2 , приготовленных по аналогичной методике, но без использования нитридной маски. Профили распределения эрбия в волноводах определяли методом рентгеновского микроанализа. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) снимали при комнатной температуре и при температурах жидкого гелия (4.2 K) и жидкого азота (77 K). Спектры возбуждения фотолюминесценции (ФВ) регистрировали в интервале длин волн $250\text{--}1000 \text{ nm}$ при 300 K .

Сравнительные исследования показали, что после легирования эрбием окисленный ПК сохраняет свои волноводные свойства. На рис. 1 представлены поперечное сечение интегрального волновода на основе окисленного ПК (*a*) и профили распределения эрбия по поверхности (*b*) и по глубине (*c*) волноводного канала. Как видно из рис. 1, *a*, каналные волноводы имеют толщину $8 \text{ }\mu\text{m}$ и ширину $20 \text{ }\mu\text{m}$. Сканирование поверхности волновода (рис. 1, *b*) показало наличие эрбия в его центральной части шириной $11\text{--}12 \text{ }\mu\text{m}$ с постоянной концентрацией $0.3 \text{ at.}\%$. При сканировании скола волновода (рис. 1, *c*) обнаружено, что концентрация эрбия возрастает от $0.3 \text{ at.}\%$ на поверхности до $0.6 \text{ at.}\%$ на глубине $2.5 \text{ }\mu\text{m}$ и сохраняется на этом уровне до глубины $4.5 \text{ }\mu\text{m}$, а затем уменьшается до $0.1 \text{ at.}\%$ на глубине более $7 \text{ }\mu\text{m}$. Сравнивая профили распределения эрбия с сечением волновода, можно заключить, что эрбий введен преимущественно в сердцевину канала. Этот результат имеет большое значение, потому что направленные волноводные моды распространяются именно по центральной части волновода [2–4].

Известно [7], что для создания эффективных оптических усилителей концентрация эрбия в волокне должна составлять не менее $0.001 \text{ at.}\%$ при длине оптоволокна несколько десятков метров. В интегральных волноводных структурах длина волновода может составлять всего несколько сантиметров и для достижения эффекта усиления концентрация эрбия должна быть не менее $0.1 \text{ at.}\%$ [7]. Полученные в настоящей работе уровни концентрации эрбия в волноводных каналах окисленного ПК удовлетворяют этому требованию.

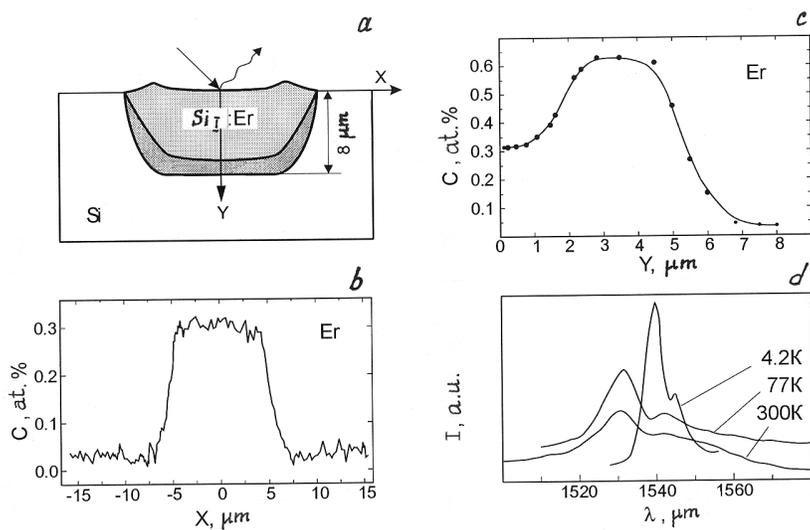


Рис. 1. Поперечное сечение интегрального волновода на основе окисленного пористого кремния Si_i (a), профили распределения эрбия Er по поверхности (b) и по глубине (c) волноводного канала и спектры фотолюминесценции легированного эрбием волновода (d).

На рис. 1, d приведены спектры ФЛ легированного эрбием волновода при облучении его поверхности сфокусированным лазерным излучением. На спектре, измеренном при 4.2 К, наблюдается интенсивный пик излучения при 1540 нм и дополнительный пик при 1545 нм. Эти пики обусловлены переходами между первым возбужденным уровнем $^4I_{13/2}$ и основным уровнем $^4I_{15/2}$ ионов эрбия [7]. При температуре 4.2 К ширины основного и дополнительного пиков равны 4.8 и 6–7 нм соответственно и определяются Штарковским расщеплением возбужденного и основного состояний ионов эрбия в поле матрицы окисленного ПК. Два пика ФЛ наблюдаются также при температурах измерения 77 и 300 К. Интенсивность основного пика уменьшалась в 3 раза при увеличении температуры от 4.2 до 300 К. Мы наблюдали небольшое различие в спектральном положении отмеченных пиков в зависимости

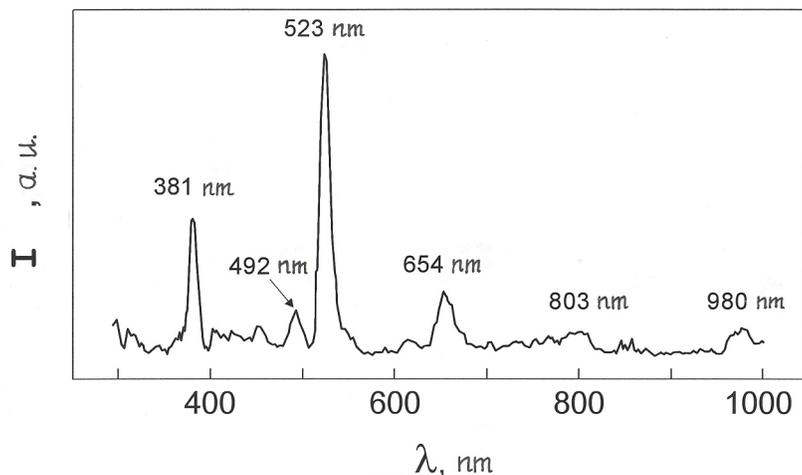


Рис. 2. Спектр фотовозбуждения легированного эрбием окисленного пористого кремния ($\lambda = 1532 \text{ nm}$).

от температуры измерения. Основной пик, фиксируемый при 1540 nm , смещается к 1532 nm при увеличении температуры измерения от 77 до 300 K . При увеличении температуры измерения от 4.2 до 300 K наблюдалось уширение основного пика от 4.8 до 21 nm .

Для исследования механизмов возбуждения эрбия в окисленном ПК были проведены измерения спектров ФВ центра, излучающего при 1532 nm . Спектр ФВ, представленный на рис. 2, имеет хорошо выраженную полосчатую структуру, свидетельствующую о прямом оптическом возбуждении ионов Er^{3+} в окисленном ПК. Положение максимумов на спектре соответствует возбуждению светом с длиной волны 381 , 492 , 523 , 654 , 803 и 980 nm , что хорошо коррелирует с положением полос оптического поглощения, которые обусловлены переходами внутри ионов эрбия: ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{G}_{11/2}$ (380 nm), ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$ (490 nm), ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^2\text{H}_{11/2}$ (524 nm), ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{F}_{9/2}$ (657 nm) и ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ (980 nm) [7–9]. Слабо выраженный пик при возбуждении светом с длиной волны 803 nm соответствует переходу ${}^4\text{I}_{15/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ (810 nm).

Как следует из рис. 2, при возбуждении ионов эрбия светом с длиной волны 381 и 523 nm интенсивность ФЛ наиболее высока, т. е. такое излучение оптимально для накачки ФЛ с длиной волны 1532 nm в оптических усилителях на базе окисленного ПК. Переходы, соответствующие этим пикам, обычно называют сверхчувствительными переходами [9].

Таким образом, электрохимическое осаждение эрбия в ПК с последующим окислением пористого слоя позволяет вводить эрбий в сердцевины волноводного канала и сохранить волноводные свойства окисленного ПК. Показано, что эрбий в волноводе находится в оптически активном состоянии. Для накачки ФЛ при 1532 nm в оптических усилителях на базе окисленного ПК наиболее эффективно излучение с длиной волны 381 и 523 nm.

Работа выполнена при частичной поддержке CRDF (грант BE2-108).

Список литературы

- [1] *Bondarenko V., Varichenko V., Dorofeev A. et al. // Tech. Phys. Lett. 1993. V. 19. P. 463–465.*
- [2] *Nagata S., Domoto C., Nichimura T., Iwameji K. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. P. 2945–2947.*
- [3] *Bondarenko V., Dorofeev A., Kazuchits N. // Microelectron. Engineering. 1995. V. 28. P. 447–450.*
- [4] *Maiello G., La Monica S., Ferrari A. et al. // Thin Solid Films. 1997. V. 297. P. 311–313.*
- [5] *Tomov A., Filippov V., Bondarenko V. // Tech. Phys. Lett. 1997. V. 23. P. 410–411.*
- [6] *Arrand H., Benson T., Loni A. et al. // Electron. Lett. 1997. V. 33. P. 1724–1725.*
- [7] *Polman A. // J. Appl. Phys. 1997. V. 82. P. 1–39.*
- [8] *Kimura T., Yokoi A., Horiguchi H. et al. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 983–985.*
- [9] *Kojan T., Kuznetzova V., Pershukovich P. et al. // J. of Appl. Spectroscopy. 1996. V. 63. P. 992–997.*