

06:07

Волноводные свойства оптических структур, полученных окислением пористого кремния

© А.В. Томов, В.В. Филиппов, В.П. Бондаренко

Институт прикладной оптики АН Беларуси, Могилев
Институт физики АН Беларуси, Минск

Поступило в Редакцию 28 января 1997 г.

В работе описаны результаты исследования оптических свойств канальных волноводов, полученных окислением пористого кремния. Произведена оценка параметров волноводов, установлено существование оптической анизотропии. Измерена величина эффективного показателя преломления основной квази-ТМ моды волновода. Полученные результаты говорят о существовании буферного слоя между волноводом и кремниевой подложкой. Высказано предположение о наличии в его пределах второго максимума показателя преломления.

Интерес к пористому кремнию обусловлен потенциальной возможностью создания на его основе базовых элементов оптоэлектронных устройств. Действительно, в нем обнаружена интенсивная фото- и электролюминесценция в видимом диапазоне спектра [1]. Кроме того, было показано, что пористый кремний является перспективным материалом для создания эффективных фотодетекторов [2], а также продемонстрирована возможность волноводного распространения света в окисленном пористом кремнии [3], однако волноводные свойства полученных структур не исследовались.

В настоящей работе представлены первые результаты исследования оптических свойств канальных волноводов, полученных окислением пористого кремния [3]. Исходными образцами служили пластины кремния, легированные бором, удельное сопротивление которых составляло 0.01 Ом/см. Рабочая сторона пластин была ориентирована в плоскости (100) и отполирована до 14 класса. Кремниевые пластины были подвергнуты обработке в кипящем перекисно-аммиачном растворе с последующей промывкой в деионизованной воде и сушкой на центрифуге в атмосфере азота. Затем на рабочую поверхность пластин

был осажден слой нитрида кремния толщиной 0,22 мкм. Стандартными методами контактной фотолитографии и плазмохимического травления в пленке нитрида были сформированы окна в виде полосок шириной 10 мкм и длиной порядка 1,5 см. После удаления фоторезиста и химической очистки пластины были подвергнуты анодной обработке в водном растворе фтористоводородной кислоты с объемной концентрацией 24%. Для анодирования использовался гальваностатический режим с плотностью анодного тока 10–20 мА/см². В результате анодной обработки участки кремния, не защищенные маской нитрида кремния, были переведены в пористый кремний толщиной порядка 12 мкм. После удаления маскирующего слоя нитрида кремния пластины были подвергнуты трехступенчатому термическому окислению [3]. При этом на поверхности кремния формировалась пленка SiO₂ толщиной 0,45 мкм, а пористый кремний окислялся на всю глубину. Увеличение объема приводило к формированию в пористом кремнии монолитного оксидного канала шириной 35 мкм и толщиной 13 мкм.

Такой канал обладает волноводными свойствами. Волноводный эффект наблюдался при возбуждении излучением гелий-неонового лазера как через торец, так и с помощью призмного устройства ввода [4]. В этом случае поверхность пластины, на которой был сформирован волновод, предварительно полировалась для удаления выступающего по границам волновода оксида, вытесненного из волноводного канала при окислении пористого кремния. Призмный метод позволил добиться некоторой селективности возбуждения мод волновода и измерить их эффективные показатели преломления n_{p1}^* . Спектр мод анализировался по картине m -линий в отраженном от основания призмы пучке. Дополнительно с помощью микроскопа контролировался уровень потерь при распространении мод в волноводе по интенсивности излучения из торца. Было обнаружено, что в волноводе возбуждаются более 50 мод, которые можно разделить на две группы, резко различающиеся уровнем потерь на распространение. Граница между ними по эффективному показателю преломления для квази-ТЕ мод расположена в районе $n_c \approx 1.4460$. Первая группа — моды низших порядков по индексу p , которые распространялись с малыми потерями менее 1 дБ/см [3]. Вторая группа — моды высших порядков по p , которые фиксировались только в отраженном пучке. Это подтверждает наличие в волноводной структуре буферного слоя, отделяющего собственно волновод от кремниевой подложки, имеющей высокий комплексный показатель преломления

($n_{si} = 3.86 - i \times 0.028$). Тогда моды, у которых эффективный показатель преломления $n_{p1}^* > n_c$, являются направляемыми и затухают слабо, а моды с $n_{p1}^* < n_c$ являются вытекающими. Визуальная оценка картины распределения интенсивности света на торце возбужденного волновода показала, что толщина буферного слоя может достигать 6 мкм. Величина максимального показателя преломления волновода n_{\max} оценивалась по измерениям n_{00}^* основной квази-ТЕ моды волновода. Известно [5], что в случае многомодового волновода эти величины близки, т. е. $n_{\max} \approx n_{00}^*$. В нашем случае $n_{00}^* = 1.4575$, что соответствует показателю преломления кварцевого стекла. Тогда величина приращения показателя преломления в волноводе $\Delta n = n_{\max} - n_c \approx 115 \cdot 10^{-4}$.

Исходя из технологии изготовления волновода можно предположить, что в нем возникают механические напряжения, приводящие к появлению оптической анизотропии. Также не исключено, что в процессе термического окисления пористого кремния происходит образование кристаллических модификаций SiO_2 . Измерения величины эффективного показателя преломления основной квази-ТМ моды волновода ($n_{00}^* = 1.4582$) подтвердили это предположение. Исследования анизотропии проводились также при помощи поляризационного микроскопа с компенсатором Сенармона на плоскопараллельных образцах поперечных срезов волноводного канала толщиной 150 мкм. Максимальное двулучепреломление наблюдалось в центральной части поперечного сечения волновода, и его величина составляла $-8 \cdot 10^{-4}$. Это, как минимум, в 2 раза меньше величины двулучепреломления γ -тридимита — оптически анизотропной фазы SiO_2 с наименьшим двулучепреломлением из всех известных кристаллических модификаций диоксида кремния [6].

Таким образом, в работе произведена оценка параметров оптических канальных волноводов, полученных окислением пористого кремния, и установлено наличие в них оптической анизотропии. Полученные результаты говорят о существовании буферного слоя, отделяющего волновод от кремниевой подложки, причем исходя из анализа спектра мод волноводной структуры и толщины этого слоя можно предположить наличие в его пределах второго максимума показателя преломления. Из полученных результатов также следует вывод о том, что такие высокопреломляющие полиморфные фазы двуоксида кремния, как стишовит или метамиктная фаза [7] (с измененным углом связи Si—O—Si), в формировании данных волноводов не участвуют.

Список литературы

- [1] *Iyer S.S., Collins R.T., Collins L.T.* Light Emission from Silicon. MRS Symp. Proc. Boston, 1992. P. 256–257.
- [2] *Zheng J.P., Jiao K.L., Shen W.P., W.A. Anderson, H.S. Kwok.* // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 61. N 4. P. 459–461.
- [3] *Bondarenko V.P., Dorofeev A.M. Kozuchic N.M.* // Microel. Eng. 1995. V. 28. P. 447–450.
- [4] *Danko S.J., Ryan-Howard D.P.* // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 8. P. 1505–1509.
- [5] *Унгер Х.-Г.* Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980. 654 с.
- [6] *Физико-химические свойства окислов.* Справочник / Ред. Г.В. Самсонов. М.: Metallurgy, 1978. 471 с.
- [7] *Ланда Л.М., Николаева И.Н.* // ДАН СССР. 1979. Т. 244. № 6. С. 1407–1410.