

- [8] Стурман Б.И. // Квантовая электроника. 1980. Т. 7. № 3. С. 483-488.
- [9] Акустические кристаллы / Под редакцией М.П. Шаскольской М.: Мир, 1982. 632 с.
- [10] Кухтарев Н.В., Семенец Т.И. // Украинский физический журнал. 1986. Т. 31. № 12. С. 1800-1807.

Поступило в Редакцию  
3 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 9

12 мая 1990 г.

06.3; 07

© 1990

ОПТИЧЕСКИЙ ВОЛНОВОД НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ  $Si-SiO_2$

**В.И. Аникин**, П.М. Житков

В последние годы проявляется повышенный интерес к оптическим волноводным структурам на подложках из кремния. Создание таких структур позволяет осуществить интеграцию электронных и оптических компонентов на единой подложке. Волноводные структуры на кремниевых подложках, в которых в качестве волноводного слоя используется двуокись кремния ( $SiO_2$ ), обладают крайне низкими оптическими потерями в широком спектральном диапазоне, позволяют обеспечить эффективную стыковку с оптическим волокном [1]. Методы, применяемые для изготовления этих волноводных структур, такие как термическое окисление кремния [2], осаждение из газовой фазы [2], гидролиз в пламени [3] являются высокотемпературными процессами (температура осаждения двуокиси кремния 450-1250 °С), что ограничивает область их применения при создании интегральных оптоэлектронных схем. Известные низкотемпературные методы получения двуокиси кремния, такие, например, как ВЧ распыление (температура осаждения < 200 °С), применялись только для изготовления гомогенных волноводных структур на подложках из плавленого кварца [4, 5]. В настоящей работе исследуется возможность применения ВЧ реактивного распыления для получения оптических волноводов из  $SiO_2$  на кремниевых подложках.

При создании волновода из двуокиси кремния (показатель преломления  $SiO_2$  на длине волны 0.6328 мкм равен 1.4573) для уменьшения потерь энергии волноводных волн в кремниевой подложке (комплексный показатель преломления кремния  $3.85-jx0.02$ ) между ней и волноводным слоем необходимо формировать буферный слой, изготовленный, например, из той же двуокиси кремния с более низким, чем у волноводного слоя, показателем преломления. На рис. 1 в качестве примера приведены расчетные зависимости

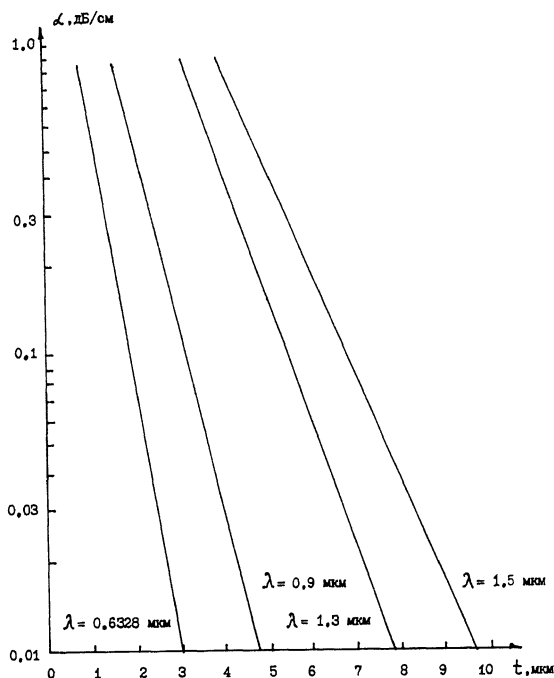


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания волны  $TE_0$  от толщины буферного слоя  $t$  волноводной структуры  $Si: SiO_2: SiO_2$ : воздух для различных длин волн  $\lambda$ . Толщина волноводного слоя бралась равной 8 мкм, разность показателей преломления волноводного и буферного слоев - 0,005.

коэффициента затухания волны  $TE$  от толщины буферного слоя для четырехслойной планарной волноводной системы.

Исследуемые в работе волноводы изготавливались методом реактивного ВЧ распыления мишени из плавленого кварца на стандартные неокисленные кремниевые подложки  $n$ - и  $p$ -типов проводимости с удельным сопротивлением от 0,01 идо 20 Ом·см. Первоначально были определены зависимости скорости роста и величины показателя преломления пленок  $SiO_2$  от режимов напыления и типа подложек. Для этого сначала проводилось напыление  $SiO_2$  в кислородно-аргоновой смеси (18%  $O_2$  и 82%  $Ar$ ) при ВЧ мощности 0,75 кВт и давлении 4 Па на фиксированные типы кремниевых подложек и подложки из плавленого кварца КУ-1, после чего проводилось измерение толщин и показателей преломления полученных пленок. Затем пленки двуокиси кремния напылялись в атмосфере технического кислорода при ВЧ мощности 0,4 кВт и давлении 2 Па на те же типы подложек и проводилось

Тип проводимости и удельное сопротивление подложки, Ом·см	Смесь $Ar+O_2$		Технический $O_2$	
	Показатель преломления	Скорость роста, нм/мин	Показатель преломления	Скорость роста, нм/мин
$n$ 0.01	1.4487	6.41	1.4505	2.51
$\rho$ 0.05	1.4493	6.24	1.4510	2.43
$n$ 20	1.4537	4.55	1.4553	1.80
$\rho$ 10	1.4543	4.38	1.4557	1.71

определение тех же параметров пленок. Результаты измерений на длине волны  $\lambda=0.6328$  мкм приведены в таблице.

Показатель преломления и толщина полученных пленок определялись по спектру замедлений мод ТЕ-поляризации, распространяющихся в пленке и возбуждаемых с помощью призмного элемента связи [6]. Как показали результаты измерений, толщины полученных пленок лежали в диапазоне 2–3.5 мкм. Для пленок такой толщины точность определения показателя преломления данным методом в зависимости от толщины составляет  $1-5 \cdot 10^{-4}$ , а точность определения толщины 5–8 нм [6]. Отметим, что, как видно из таблицы, показатели преломления и скорости роста пленок зависят как от величины проводимости подложек, так и от параметров режима напыления. В отличие от данных, приведенных в [4, 5], пленки двуокиси кремния, полученные нами на всех типах подложек в двух указанных режимах напыления, имели пониженный по сравнению с плавленым кварцем показатель преломления. Это подтверждалось также тем, что пленки, напыленные на подложки из кварца КУ-1, волноводными свойствами не обладали.

Четырехслойные волноводные структуры изготавливались путем последовательного напыления пленок  $SiO_2$  сначала в кислородно-аргоновой смеси, а затем в атмосфере кислорода. На всех типах кремниевых подложек были получены оптические волноводы, поддерживающие 2–3 моды ( $\lambda=0.6328$  мкм). У всех волноводов замедления основных мод ТМ-типа были больше замедлений основных мод ТЕ-типа, что говорит о положительной оптической анизотропии полученных пленок. Например, волновод, полученный на подложке  $n$ -типа с удельным сопротивлением 0.01 Ом·см, состоял из буферного слоя толщиной 5.6 мкм ( $n=1.4487$ ) и волноводной пленки толщиной 6.7 мкм ( $n=1.4506$ ). Данный волновод поддерживал три волноводные моды с замедлениями  $n(TM_0)=1.4504$ ,  $n(TE_0)=1.4501$ ,  $n(TE_1)=1.4488$  и обладал положительной оптической анизотропией  $n_{TM}-n_{TE}=3.5 \cdot 10^{-4}$ . Приведенные выше толщина и показатель преломления волноводного слоя получены путем расчета по спектру указанных замедлений волноводных мод. Расчет проводился по модели трехслойного волновода, при этом показатель преломления подложки считался известным

(см. таблицу). Толщина буферного слоя определялась по времени напыления. Оптические потери в полученных волноводах измерялись методом, состоявшим в последовательном уменьшении длины образца путем скалывания и измерении световой энергии, излучаемой из торца волновода при неизменных условиях ввода излучения в волновод [7]. Коэффициент оптических потерь основных мод, определенный таким образом, не превышал 0.5 дБ/см. Волноводное распространение света в полученных структурах имело место также и на длинах волн 0.4416 и 1.15 мкм. Во всех волноводах наблюдалась интерференция рассеянных полей волноводных мод, обусловленная малым различием их замедлений [8]. На рис. 2 приведена фотография рассеянного излучения мод  $TE_0$  и  $TM_0$  ( $\lambda = 0.4416$  мкм) в одном из волнопроводов.

Таким образом, в работе методом реактивного ВЧ распыления получены четырехслойные планарные оптические волноводы из  $SiO_2$  на кремнии, обладающие потерями менее 0.5 дБ/см на длине волны 0.6328 мкм. Установлено, что величина показателя преломления и скорость роста пленок  $SiO_2$  зависят от величины проводимости подложки. Скорость роста выше, а показатель преломления ниже для подложек с более низким удельным сопротивлением. Как показали эксперименты, изменение режима напыления, а именно, добавление в состав распылительной смеси  $Ar$ , приводило к понижению показателя преломления пленок и увеличению скорости их роста при фиксированной проводимости подложки. Полученные пленки обладали положительной оптической анизотропией и пониженным по сравнению с плавленым кварцем показателем преломления.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Takato H., Jinguji K., Yasu M., Toba H., Kawachi M. // Journal of Lightwave Technology. 1988. V. 6, No 6. P. 1003-1010.
- [2] Verbeek B.H., Henry C.H., Olsson N.A., Orlovsky K.J., Kazarinov R.E., Johnson B.H. // Journal of Lightwave Technology. 1988. V. 5, N 6. P. 1011-1015.

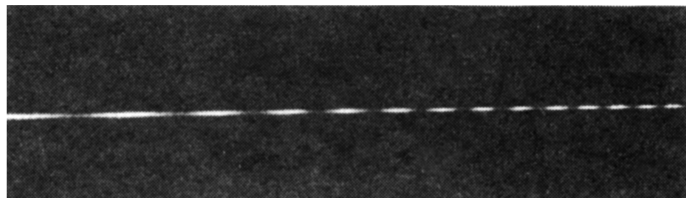


Рис. 2. Рассеянное излучение волноводных мод  $TE_0$  и  $TM_0$  при  $\lambda = 0.4416$  мкм в волноводной структуре двуокись кремния-кремний

- [3] Kawachi M., Yasu M., Edahiro T. // Electronics Letters. 1983. V. 19. No 15. P. 583-584.
- [4] Петровский Г.Т., Редько В.П., Хомченко А.В. // ЖТФ. 1984. Т. 54, В. 10. С. 2045-2047
- [5] Ланда К.А., Петровский Г.Т. Аморфные планарные волноводы. Красноярск: Красноярский госуниверситет, 1987. 195 с.
- [6] Житков П.М. // Мат. X конф. мол. ученых Ун-та дружбы народов. М., 13-19 апреля 1987. М.: УДН, 1987. Ч. 3. С. 92-99. Деп. в ВИНТИ 29.12.87, № В-87.
- [7] Хансперджер Р. Интегральная оптика. Теория и технология. М.: Мир, 1987. 397 с.
- [8] Агапов А.Ю., Зайцев С.В. // Оптика и спектроскопия. 1981. Т. 51. № 4. С. 400-401.

Поступило в Редакцию  
26 января 1990 г.