

6. Мокеров В. Г., Сарайкин В. В. Изменение оптических свойств двуокиси ванадия при фазовом переходе полупроводник — металл. — «ФТТ», 1976, т. 18, вып. 7, с. 1801.
7. Волькенштейн А. А., Кувалдин Э. В. Фотоэлектрическая импульсная фотометрия. Л., «Машиностроение», 1975.
8. Тихонов А. А., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1972.
9. Berglund G. N., Guggenheim H. J. Electronic properties of VO_2 near the semiconductor-metal transition. — "Phys. Rev.", 1969, vol. 185, N 3, p. 1022.

Поступила в редакцию 25 января 1977 г.;
окончательный вариант — 12 июля 1977 г.

УДК 621.378.9

В. В. ВАСИЛЬЕВ, В. Г. ПАНЬКИН,
В. П. ПОПОВ, Г. М. ЦЕЙТЛИН

(Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОДНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$

В настоящее время в электронной промышленности разработаны и выпускаются весьма совершенные кремниевые полупроводниковые приборы, в которых в качестве диэлектрических покрытий используются пленки из двуокиси, оксинитрида и нитрида кремния. Волноводы, полученные из оксинитрида и нитрида кремния, обладают малыми потерями света ($< 0,4$ дБ/см) [1]. Задачи микроэлектроники стимулируют исследование по созданию различных элементов и конструкций интегральной оптики в системе $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ [2, 3].

Одной из важных задач при создании элементов интегральной оптики является анализ и выбор оптимальных условий для получения высококачественных тонкопленочных волноводов. В настоящее время для системы $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ по этому вопросу в литературе имеется мало сведений [1, 2]. Анализ влияния толщины буферного слоя двуокиси кремния на величину потерь света в волноводе проводился без учета поглощения в подложке [3]. Такой анализ для металлических подложек с отрицательной действительной частью диэлектрической проницаемости выполнен в работе [4].

Цель настоящей работы — расчет распространения света в плоских волноводах с буферным слоем и поглощающей подложкой, сравнение с экспериментальными результатами и исследование волноводных свойств системы $\text{Si}-\text{SiO}_2-\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$.

Для расчета четырехслойной системы (рис. 1) с поглощающей подложкой использовалась картина зигзагообразного распространения света в волноводе, которая, как показано в [5], точна при учете проникновения электромагнитной волны в окружающие среды на некоторую эффективную глубину. Методика расчета полностью соответствует работе [6], в которой не учитывалось поглощение в подложке. Предполагалось, что было выполнено условие $n_3 > n_1 > n_2 \geq n_0$. Получены

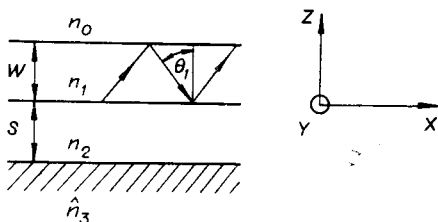


Рис. 1. Схема волноводной структуры:
 n_0, n_1, n_2 — показатели преломления окружающей среды, ξ — волновода; буферного слоя соответственно; W и S — толщина волновода и буферного слоя соответственно; $\hat{n}_3 = n_3 + i\chi_3$ — комплексный показатель преломления подложки (n_3 — показатель преломления, χ_3 — коэффициент поглощения); θ — угол падения света на границы волновода.

дисперсионное уравнение и выражение для потерь в волноводе (α), обусловленных утечкой света в подложку, в следующем виде:

$$kWb_1 - \Phi_{10} - \Phi'_{12} = \pi m; \quad (1)$$

$$\alpha \left(\frac{\text{дБ}}{\text{см}} \right) = 10 \lg e \frac{R_{12} - 1}{n^* W} (n_1^2 - n^{*2})^{1/2}, \quad (2)$$

где $m = 0, 1, 2, \dots$ — номер моды; Φ_{10}, Φ'_{12} — изменение фазы при отражении на границах волновода; R_{12} — коэффициент отражения на границе между 1-й и 2-й средами; $n^* = n_1 \sin \theta$ — эффективный показатель преломления волновода; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число в свободном пространстве; $b_i = (n_i^2 - n^{*2})^{1/2}$ ($i = 1, 3$).

Изменения фаз Φ_{10}, Φ'_{12} и коэффициент отражения R_{12} имеют вид:

$$\text{tg } \Phi_{10} = p_0 l / b_1; \quad (3)$$

$$\text{tg } \Phi'_{12} = \frac{T^2 - U^2 + V^2 - Z^2}{2(TZ + UV)} \left(\sqrt{1 + \frac{4(TZ + UV)^2}{(T^2 - U^2 + V^2 - Z^2)^2}} - 1 \right); \quad (4)$$

$$R_{12} = \frac{[(T^2 - U^2 + V^2 - Z^2)^2 + 4(TZ + UV)^2]^{1/2}}{(T + U)^2 + (V - Z)^2}. \quad (5)$$

Для сокращения записи в (3)–(5) введены обозначения:

$$T = H(f \cos \delta + d \sin \delta);$$

$$U = Cg[1 + Hh(f \sin \delta - d \cos \delta)];$$

$$V = h + H(f \sin \delta - d \cos \delta);$$

$$Z = ghHC(f \cos \delta + d \sin \delta);$$

$$f = \begin{cases} \frac{n_3^2 - \chi_3^2}{n_2^2} - \text{ТМ моды;} \\ 1 - \text{ТЕ моды;} \end{cases} \quad l = \begin{cases} \frac{n_1^2}{n_0^2} - \text{ТМ моды;} \\ 1 - \text{ТЕ моды;} \end{cases}$$

$$d = \begin{cases} \frac{2n_3\chi_3}{n_2^2} - \text{ТМ моды;} \\ 0 - \text{ТЕ моды;} \end{cases} \quad g = \begin{cases} \frac{n_1^2}{n_2^2} - \text{ТМ моды;} \\ 1 - \text{ТЕ моды;} \end{cases}$$

$$p_j = (n^{*2} - n_j^2)^{1/2} \quad (j = 0, 2); \quad C = \frac{p_2}{b_1};$$

$$\delta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2n_3\chi_3}{b_3^2 - \chi_3^2} \right); \quad H = \frac{p_2}{[(b_3^2 - \chi_3^2)^2 + 4n_3^2\chi_3^2]^{1/4}};$$

$$h = \text{th}(kWp_2).$$

Полученные выражения (1)–(5) использовались для расчета зависимостей эффективного показателя преломления n^* и потерь α от толщины буферного слоя S для системы воздух — оксинитрид кремния — двуокись кремния — кремний. Вычисления осуществлялись при следующих значениях параметров: $n_0 = 1$, $n_2 = 1,46$, $n_3 = 3,9$, $\chi_3 = 0,02$, длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм [7].

Для экспериментально доступной области измерений на рис. 2 приведены зависимости потерь от толщины буферного слоя двуокиси кремния при некоторых значениях показателя преломления ($n_1 = 2; 1,6$) и толщины ($W = 1; 0,6$ мкм) волноводного слоя для четырех первых мод ($\text{TE}_0, \text{TM}_0, \text{TE}_1, \text{TM}_1$). Величины эффективных показателей преломления при данных параметрах отличались от значения эффективного показателя преломления для идеального волновода ($S = \infty$) только

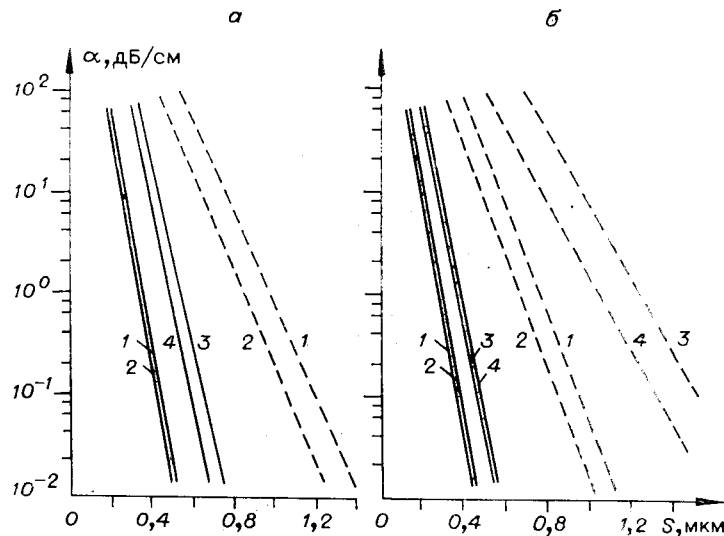


Рис. 2. Зависимость потерь α , обусловленных утечкой волноводного света в подложку, от толщины буферного слоя S :
 $a - W=0,6$ мкм, $b - W=1$ мкм, $n_1=2$ (сплошная линия); $n_1=1,6$ (штриховая линия); 1 — TM_0 , 2 — TE_0 , 3 — TM_1 , 4 — TE_1 .

в четвертом знаке после запятой и поэтому здесь не приведены. Полученные зависимости позволяют выбирать оптимальные параметры волноводного слоя и толщины буферного слоя двуокиси кремния. Следует отметить некоторые закономерности поведения потерь (см. рис. 2).

С увеличением показателя преломления (при $W = \text{const}$) и толщины (при $n_1 = \text{const}$) волноводного слоя потери для каждой моды уменьшаются. Это связано с тем, что увеличение показателя преломления и толщины волноводного слоя приводит к увеличению значения эффективного показателя преломления, т. е. свет в волноводе распространяется под меньшими углами к поверхности. Вследствие этого глубина проникновения поля в буферный слой уменьшается и влияние подложки на потери проявляется в меньшей степени. Увеличение потерь с увеличением номера моды при фиксированных n_1 , W и S также объясняется уменьшением величины эффективного показателя преломления.

Следует отметить и то обстоятельство, что потери для ТМ волны могут быть больше или меньше потерь для ТЕ волны в зависимости от параметров волноводных слоев. Так, для волноводов толщиной 1 мкм (см. рис. 2) потери при $n_1=1,6$ для ТМ волн больше, чем для ТЕ волн. Но при $n_1=2$ потери для ТМ волн уже меньше потерь для ТЕ волн.

Для объяснения такого поведения α обратимся к анализу происхождения потерь, обусловленных утечкой света в подложку. В системе $Si-SiO_2-Si_xO_yN_z$ потери определяются туннелированием электромагнитной волны в кремниевую подложку через буферный слой окиси кремния, т. е. величиной поля на границе двуокись кремния — кремний. Действительно, расчет интенсивностей TE_0 и TM_0 волн, выполненный для случая $S = \infty$ (рис. 3), позволяет объяснить отмеченное выше поведение зависимостей рис. 2. Затухание амплитуды ТЕ волн происходит всегда быстрее ТМ волн. Поэтому если амплитуда ТМ волны на границе оксид кремния — двуокись кремния будет больше амплитуды ТЕ волны, то потери для ТМ волны всегда будут больше потерь для ТЕ волны. В противном случае потери для ТМ волны будут больше или меньше потерь для ТЕ волны в зависимости от толщины буферного слоя. При этом следует отметить, что равенство интенсивностей ТМ и ТЕ волн с увеличением показателя преломления и толщины волноводного

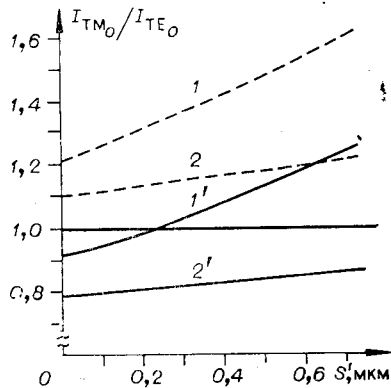


Рис. 3. Отношение интенсивностей TM_0 волны и TE_0 волны в буферном слое как функция расстояния S' от границы 1—2 в случае $S = \infty$:

$W = 0,6$ мкм (штриховая линия), $W = 1$ мкм (сплошная линия), $1(1') - n_1 = 1,6$; $2(2') - n_1 = 2$.

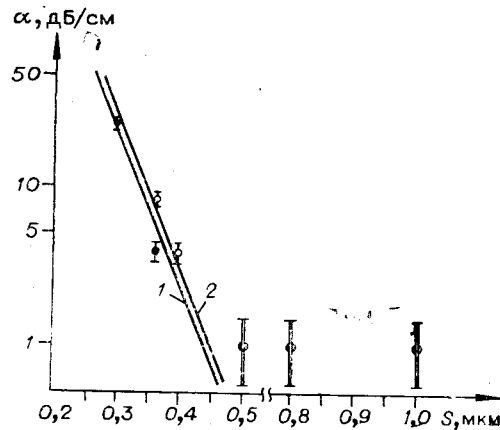


Рис. 4. Зависимость потерь α света в волноводе ($n_1 = 1,92$, $W = 0,4$ мкм) от толщины буферного слоя S :

расчет: 1 — TE_0 , 2 — TM_0 ; эксперимент: ● — TE_0 , ○ — TM_0 .

слоя наблюдается на больших расстояниях от границы волновод — буферный слой.

В наших экспериментах в качестве волноводных слоев служили пленки оксинитрида или нитрида кремния на термически окисленном кремнии. Слои оксинитрида кремния выращивались методом пиролиза моносилана с дозированным добавлением кислорода при 875°C в горизонтальном кварцевом реакторе. Термическое окисление кремния проводилось при 1150°C в парах воды до заданной толщины. Контроль толщины и показателя преломления окисных и оксинитридных слоев на кремнии проводился на эллипсомере ЛЭФ-2. Ввод света в волноводы осуществлялся через призму, потери определялись фотометрированием трека.

На первом этапе нашей работы исследовалось качество волноводов из оксинитрида кремния, полученных описанным способом. Показатель преломления волноводных слоев изменялся в пределах $1,55-1,95$. Чтобы избежать влияния кремниевой подложки (см. рис. 2) для всех исследовавшихся волноводных слоев (толщина $0,5-0,55$ мкм), толщина буферного слоя была выбрана равной $1,2$ мкм.

Для всех исследованных показателей преломления оксинитридных слоев потери света в волноводах были менее 1 дБ/см, что свидетельствует о достаточно хорошем качестве полученных волноводов.

Для экспериментальной проверки результатов расчета были приготовлены образцы с такими толщинами буферного слоя, чтобы проявлялось наличие поглощающей подложки кремния. На рис. 4 приведены зависимости потерь от толщины пленки двуокиси кремния для волновода с показателем преломления $n_1 = 1,92$ (расчетные и экспериментальные значения потерь для TE_0 и TM_0 мод). Наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Это свидетельствует о правильности расчета и еще раз подтверждает хорошее качество исследовавшихся оксинитридных слоев.

Потери света, обусловленные утечкой в кремниевую подложку, с увеличением длины волны падающего излучения должны увеличиваться. Соответствующим выбором толщины буферного слоя в наших экспериментах наблюдалось сильное различие (больше чем в 20 раз) в величине потерь для двух длин волн $0,6328$ и $0,4416$ мкм (рис. 5).

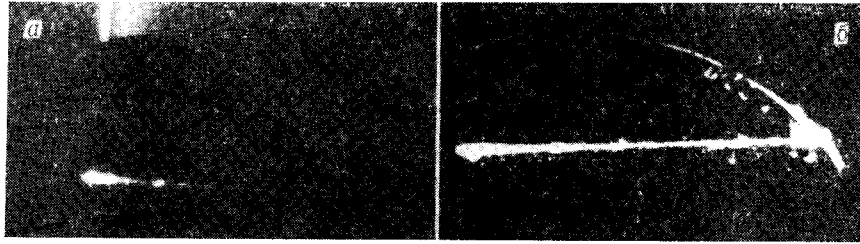


Рис. 5. Изображения треков света, распространяющегося в волноводе: а — $\lambda = 0,63$ мкм, б — $\lambda = 0,44$ мкм:
 $n_1 = 1,92$, $W = 0,49$ мкм, $S = 0,3$ мкм, $n_2 = 1,46$.

Следовательно, выбором толщины буферного слоя можно создать грубые частотные фильтры, отсекающие длинноволновую часть спектра падающего излучения.

В заключение остановимся на возможности определения параметров четырехслойной системы в экспериментально доступной области измерения потерь (0,1—50 дБ/см). Зная параметры окружающей среды, можно определить показатель преломления и толщину одномодовых волноводов, измеряя угол ввода и потери. На практике часто в качестве одной из окружающих сред является воздух ($n_0 = 1$). Тогда для двухмодовых волноводов можно определить показатель преломления и толщину буферного слоя (при известных параметрах подложки) либо показатель преломления и поглощения подложки (при известных параметрах буферного слоя) и найти показатель преломления и толщину волновода, измеряя углы ввода и потери для двух мод. Для определения параметров используются выражения (1) и (3). Так были выполнены оценки точности определения толщины буферного слоя двуокиси кремния по измерению потерь при следующих данных: $n_0 = 2$, $W = 1$ мкм, точность измерения потерь 0,1 дБ/см. В этом случае толщина двуокиси кремния 250 нм (см. рис. 2) будет измеряться с точностью ± 1 нм.

Авторы признательны В. В. Шашкину, С. Ю. Рязанову, Г. И. Безязыковой за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rand M. J., Standley R. D. Silicon oxynitride films on fused silica for optical waveguides.—“Appl. Opt.”, 1972, vol. 11, p. 2482.
2. Boivin L. P. Thin-film laser-to-fiber coupler.—“Appl. Opt.”, 1974, vol. 13, p. 391.
3. Ostrowsky D. B., Poirier R., Reiber L. M., Deverdun C. Integrated optical photodetector.—“Appl. Phys. Lett.”, 1973, vol. 22, p. 463.
4. Rashleigh S. C. Four-layer metal-clad thin film optical waveguides; Equal-phase-velocity for the TE and TM modes of planar metal-clad optical waveguides.—“Opt. Quant. Electr.”, 1976, vol. 8, p. 49, 241.
5. Kogelnik H., Weber H. P. Rays, stored energy and power-flow in dielectric waveguides.—“J. Opt. Soc. Amer.”, 1974, vol. 64, p. 174.
6. Tien P. K., Ulrich R. Theory of prism-film coupler and thin-film light guides.—“J. Opt. Soc. Amer.”, 1970, vol. 60, p. 1325.
7. Егорова Г. А., Иванова Н. С., Потапов Е. В., Раков А. В. Эллипсометрия субтонких прозрачных пленок.—«Опт. и спектр.», 1974, т. 36, с. 773.

Поступила в редакцию 2 декабря 1976 г.