

УДК 621.378.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ СВЕТОВОЙ МОЩНОСТИ В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ ВОЛНОВОДЕ НА ПОДЛОЖКЕ ИЗ КРЕМНИЯ

Ю. А. Быковский, Ю. Н. Кульчин, М. О. Розовский, В. Л. Смирнов,
Ф. Г. Старос

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование потерь мощности оптического излучения в тонкопленочных волноводах, расположенных на кремниевой подложке с буферным слоем из окиси кремния. Исследовано влияние обработки подложки методами фотолитографии при создании в ней простейшей микроэлектронной схемы на потери в волноводном слое.

Дальнейшее усовершенствование оптических линий связи и обработки информации требует применения элементов и устройств интегральной оптики. Наибольший интерес представляют комбинированные интегрально-оптические и микроэлектронные системы [1, 2]. В подобных устройствах возникает необходимость размещения оптических элементов на кремниевых подложках, которые, как правило, являются поглощающими для излучения, используемого в оптических схемах.

Вопрос о потерях мощности светового излучения, распространяющегося в волноводах на основе нитрида (Si_3N_4) и оксинитрида ($\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$) кремния на подложках из Si с буферными слоями из SiO_2 , исследовался в работах [3, 4]. Однако для расчета потерь световой мощности в них были предложены достаточно сложные выражения, что затрудняет их использование.

Целью настоящей работы является исследование потерь мощности оптического излучения в тонкопленочных волноводах (ТПВ), расположенных на кремниевых подложках с буферными слоями из окиси кремния различной толщины, до и после создания на ней методом фотолитографии микросхем.

Рассмотрим волноводную структуру, схематично изображенную на рис. 1, где n_0, n_1, n_2, n_3 — соответственно показатели преломления покрытия, волноводной пленки, буферного слоя и подложки, причем $n_0 < n_2 < n_1 < \text{Re } n_3 = n'_3$. (В общем случае n_3 — комплексная величина, вводимая для учета диссипации мощности световой волны.) Наличие подложки с показателем преломления большим, чем показатель преломления ТПВ, оказывает возмущающее действие на распространяющуюся в волноводе световую волну. В результате этого часть световой мощности переизлучается в подложку и поглощается, что приводит к потере мощности излучения.

Поле в волноводе удовлетворяет скалярному волновому уравнению [5]. Используя условие непрерывности компонент поля на границах слоев, получим характеристическое уравнение

$$\sin(p_1 h - \delta_{10} - \delta_{12}) = \sin(p_1 h + \delta_{10} - \delta_{12}) \exp(-2p_2 \Delta) \exp(2i \delta_{32}), \quad (1)$$

где

$$p_j^2 = k^2(n_j^2 - \tilde{n}_m^{*2}) \quad (j = 1, 3); \quad p_l^2 = k^2(\tilde{n}_m^{*2} - n_l^2) \quad (l = 0, 2);$$

$$k = 2\pi/\lambda,$$

λ — длина световой волны в вакууме, \tilde{n}_m^* — эффективный показатель преломления волноводной моды в рассматриваемой структуре, i — мнимая единица, $\delta_{ij} = \text{arctg} [(n_j/n_i)^{2x}(p_i/p_j)]$ ($x = 0$) для ТЕ-волн, $x = 1$ для ТМ-волн, h — толщина волноводной пленки, d — толщина волновода с буферным слоем, $\Delta = d - h$, m — индекс моды ($m = 0, 1, 2, \dots$).

Уравнение (1) позволяет определить параметры световой волны, распространяющейся в такой волноводной структуре. Левая часть этого уравнения имеет такой же вид, как и в случае характеристического уравнения для обычной трехслойной структуры, когда $n_0 < n_2 < n_1$ [6]. Однако наличие оптически более плотной подложки приводит к появлению в уравнении (1) отличной от нуля правой части и, в свою очередь, изменяет значение эффективного показателя преломления на величину δn_m^* . Можно записать

$$\tilde{n}_m^* = n_m^* + \delta n_m^*, \quad (2)$$

где n_m^* — эффективный показатель преломления волноводной моды в случае $\Delta \rightarrow \infty$, $\delta n_m^* = \delta n_{1m}^* + i \delta n_{2m}^*$, δn_{1m}^* , δn_{2m}^* — соответственно вещественная и мнимая части изменения эффективного показателя преломления.

В общем случае для нахождения из уравнения (1) величины δn_m^* следует воспользоваться численными методами. Исключение составляет случай достаточно большой толщины буферного слоя Δ . Тогда при выполнении условия $\exp(-2p_2 \Delta) \ll 1$ величина $\delta n_m^*/n_m^*$ представляет собой малый параметр и выражение для величины δn_m^* может быть получено в аналитическом виде.

Применяя метод малых возмущений, находим

$$\delta n_{2m}^* = \frac{A_m}{kh_m^*} \sin(\Phi_m) \sin(2\delta_{32}) \exp(-2p_2 \Delta), \quad (3)$$

где

$$A_m = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_m^{*2}}}{n_m^*}, \quad h_m = h + \left(\frac{n_1}{n_0}\right)^{2x} \frac{1}{\sqrt{n_m^{*2} - n_0^2}} +$$

$$+ \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{2x} \frac{1}{\sqrt{n_m^{*2} - n_2^2}} \quad (\text{см. [7]}), \quad \Phi_m = p_1 h + \delta_{10} - \delta_{12}.$$

Таким образом, постоянная распространения волноводной моды при наличии возмущающей подложки становится комплексной величиной:

$$\beta_m = k\tilde{n}_m^* = k(n_m^* + \delta n_{1m}^*) + ik\delta n_{2m}^*. \quad (4)$$

В результате этого поле световой волны в ТПВ будет изменяться в направлении распространения по закону $\exp[ik(n_m^* + \delta n_{1m}^*)z] \times \times \exp(-k\delta n_{2m}^*z)$. Тогда выражения для коэффициента потерь мощности примет вид

$$\alpha = 2k\delta n_{2m}^*. \quad (5)$$

В работе были проведены измерения коэффициента потерь мощности световой волны, распространяющейся по оптическому волноводу, в зависимости от толщины буферного слоя из SiO_2 и от толщины ТПВ. В экспериментах использовались ТПВ, изготовленные из полистирола и трехсернистого мышьяка (As_2S_3). Буферные пленки SiO_2 получались окислением предварительно очищенной и отполированной поверхности кремния в атмосфере кислорода. На рис. 1 приведены расчетные и экспериментально полученные (обозначены кружками) зависимости коэффициента потерь мощности световой волны от толщины буферного слоя SiO_2 для волноводов из полистирола. Кривые 1, 3, 5 относятся к волноводу толщиной 1 мк, а кривые 2, 4 построены для волновода толщиной 1,5 мк. Кривые 1 и 2 соответствуют TE_0 -модам, кривые 3 и 4 — TE_1 -модам, кривая 5 — TE_2 -моде. Экспериментальные точки приведены для волноводов толщиной 1 мк.

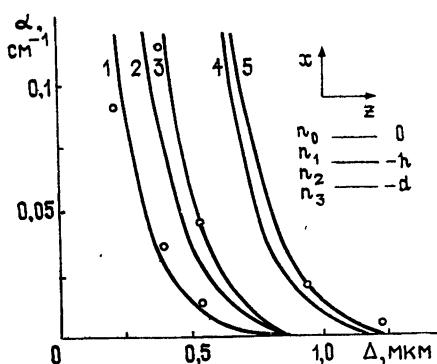


Рис. 1.

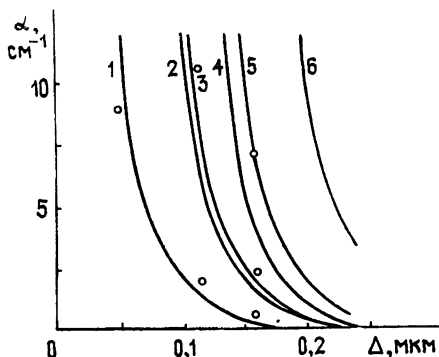


Рис. 2.

На рис. 2 показаны зависимости коэффициента потерь мощности от толщины буферного слоя SiO_2 для волноводов из As_2S_3 . Кривые 1, 3, 5 построены для волноводов толщиной 0,6 мк, а кривые 2, 4, 6 — для волноводов толщиной 1,0 мк, обозначения следующие: 1, 2 — TE_0 -моды, 3, 4 — TE_1 -моды, 5, 6 — TE_2 -моды. Экспериментальные данные приведены для волноводов с толщиной 0,6 мк.

Потери в волноводе измерялись по длине трека световой волны в пленке с помощью выводящей призмы, которая перемещалась вдоль трека, с одновременной регистрацией выходящего излучения фотоэлектронным умножителем. Измерения проводились с помощью He—Ne-лазера ($\lambda = 0,6328$ мк). Некоторое различие расчетных и экспериментальных данных обусловлено, по-видимому, недостаточной точностью измерений толщины буферной пленки. Измерение потерь мощности для волноводов из As_2S_3 с толщиной 1 мк при толщине буферного слоя около 0,15 мк показало, что их уровень снизился примерно в 3 раза по сравнению с потерями в аналогичных по параметрам структурах, выполненных на основе полистирола. Это обусловлено меньшим проникновением поля моды в кремниевую подложку, вследствие увеличения разности между показателями преломления n_1 и n_2 . Следует отметить, что из-за экспоненциального уменьшения коэффициента потерь с ростом толщины буферного слоя рис. 1 и рис. 2 выполнены в разных масштабах, поэтому указанная точка на рисунке не нанесена. Таким образом, при толщинах буферного слоя порядка 1 мк потери мощности остаются на низком уровне и вполне приемлемы.

В работе также проводилось исследование обработки подложки методами фотолитографии при создании в ней простейшей микроэлект-

ронной схемы (типа матрицы фотодетекторов [1]), при этом измерялись потери световой мощности для различных толщин буферного слоя. Оказалось, что при изготовлении комбинированной интегрально-оптической схемы с толщиной буферного слоя больше 1 мк потери мощности в оптическом волноводе возрастают в 3—4 раза. Кроме того, при применении фотолитографии в буферной пленке возникают области, где буферный слой полностью отсутствует, что делает невозможным распространение излучения. В то же время при толщинах буферного слоя меньше $0,5 \text{ мк}$ существенных отличий до и после формирования микроэлектронной схемы не наблюдалось.

Таким образом, при формировании монокристаллических комбинированных интегрально-оптических и микроэлектронных схем необходимо тщательно отрабатывать и искать новые технологические процессы создания изолирующего буферного слоя SiO_2 , проводить оптимизацию его толщины, а также использовать материалы для ТПВ, позволяющие совмещать технологию нанесения волноводной пленки с технологией кремниевых интегральных схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Быковский, О. Р. Мочалкина, В. Л. Смирнов, А. В. Шмалько, Письма в ЖТФ, 4, 534 (1978).
2. Е. Б. Володин, К. К. Свидзинский, Электронная промышленность, вып. 6 (60), 75 (1977).
3. В. В. Васильев, В. Г. Панькин, В. П. Попов, Г. М. Цейтлин, Автометрия, № 2, 22 (1978).
4. W. Stutius, W. Streifer, Appl. Opt., 16, 3218 (1977).
5. P. K. Tien, Rev. Modern Phys., 49, 361 (1977).
6. S. Wang, J. Appl. Phys., 44, 767 (1973).
7. Г. Когельник, УФН, 121, 695 (1977).

Московский инженерно-физический институт

Поступила в редакцию
16 января 1979 г.

INVESTIGATION OF LIGHT POWER LOSSES IN THIN-FILM WAVEGUIDE WITH A SILICON BASE LAYER

Yu. A. Bykovskij, Yu. N. Kul'chin, M. O. Rozovskij, V. L. Smirnov, F. G. Staros

Theoretical and experimental investigation is carried out of optical radiation power losses in thin-film waveguides located on a silicon base layer with a silicon oxide buffer layer. The effect of the base layer processing by photolithography methods is studied when creating in it the simplest microelectron diagram for the losses in the waveguide layer.