

06.3; 07

© 1991

ВЫТЕКАЮЩИЕ МОДЫ В ВОЛНОВОДНОЙ СИСТЕМЕ $Si-SiO_2$

П.М. Ж и т к о в

Оптические волноводы на кремниевых подложках, в которых в качестве несущего слоя используются пленки SiO_2 , обладают крайне низкими оптическими потерями в широком спектральном диапазоне длин волн от 500 до 1800 нм, позволяют обеспечить эффективную стыковку с оптическим волокном [1, 2]. В настоящей работе исследуются особенности распространения поверхностных оптических волн в волноводной системе $Si-SiO_2$ -воздух (рис. 1). Показано, что в такой системе моды пленки в определенном интервале толщин слоя SiO_2 могут становиться вытекающими.

В рассматриваемом диапазоне длин волн монокристаллический кремний характеризуется комплексной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_1 = \epsilon_1' - j\epsilon_1''$, причем $\epsilon_1' \gg \epsilon_1'' > 0$. Пленка SiO_2 обладает в данном диапазоне малыми оптическими потерями и характеризуется действительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_2 < \epsilon_1'$. На границе пленка-воздух поверхностная оптическая волна, распространяющаяся по пленке SiO_2 , испытывает полное внутреннее отражение. На границе пленка-кремний модуль коэффициента отражения волны всегда меньше единицы, при этом волна частично отражается, а частично излучается в кремниевую подложку. Эффективный показатель преломления (ЭПП) волноводной моды β и коэффициент затухания моды α достаточно точно можно определить, используя приближенные методы [3]. В частности, коэффициент затухания моды определяется модулем $|r|$ френелевского коэффициента отражения волны на границе SiO_2-Si и зависит от угла падения волны

$\theta = \arcsin\left(\frac{\beta}{\sqrt{\epsilon_2}}\right)$ на эту границу:

$$k_0\alpha = -\frac{2n|r|}{2 \cdot h \cdot \operatorname{tg}\theta} \quad (1)$$

Зависимость y -составляющей поля моды (E_y для ТЕ-мод и H_y для ТМ-мод) в кремниевой подложке от координаты x имеет вид $F_y \sim \exp(k_1 x)$, где

$$k_1 = k_0 \sqrt{\gamma^2 - \epsilon_1} = k_0 \sqrt{(\beta^2 - \alpha^2 - \epsilon_1') + j(\epsilon_1'' - 2\alpha\beta)} = k_0 \sqrt{\rho + j\eta} = \alpha + j\beta \quad (2)$$

— поперечное волновое число моды в среде 1. Поскольку рассматриваемая волноводная система обладает потерями, вектор Умова-

Поинтинга имеет ненулевую поперечную составляющую S_x . Так как

$$S_x = \frac{1}{2} \operatorname{Re}([\vec{E}, \vec{H}]) \sim -b \cdot \exp(2\alpha x),$$

то его направление в подложке определяется знаком мнимой части k_1 , а характер изменения модуля поля моды по оси ox $|F_y| \sim \exp(\alpha x)$ (возрастание или убывание) зависит от знака действительной части k_1 . Для рассматриваемых мод пленки $\beta < \sqrt{\epsilon_2} < \sqrt{\epsilon_1'}$, поэтому величина p в (2) всегда меньше нуля. Знак величины q определяется величиной затухания волноводной моды α . Если $\epsilon_1'' > 2\alpha\beta$, то $q > 0$ и волновое число k_1 может лежать либо в I ($a > 0$, $b > 0$), либо в III ($a < 0$, $b < 0$) квадранте комплексной плоскости. Как отмечалось выше, энергия моды излучается в подложку ($\beta < \sqrt{\epsilon_1'}$), поэтому компонента S_x в кремнии должна быть направлена от нижней границы пленки вглубь подложки, т.е. S_x должно быть меньше нуля и, следовательно, $b > 0$. Таким образом, рассматриваемой задаче соответствует корень в I квадранте, при этом модуль поля $|F_y| \rightarrow 0$ при $x \rightarrow -\infty$ и волна является поверхностной. Анализ выражения (1) с учетом условия $\epsilon_1''/\epsilon_1' \ll 1$ показывает, что в рассматриваемой системе возможны ситуации, когда $\epsilon_1'' < 2\alpha\beta$. При этом $q < 0$ и k_1 может лежать либо во II ($a < 0$, $b > 0$), либо в IV ($a > 0$, $b < 0$) квадранте. И в этом случае энергия моды по-прежнему излучается в подложку, поэтому в (2) необходимо брать значение корня во II квадранте. Таким образом, модуль амплитуды поля при удалении от нижней границы пленки вглубь подложки возрастает $|F_y| \rightarrow \infty$ при $x \rightarrow -\infty$, т.е. она является вытекающей [3]. Обозначим комплексный показатель преломления кремния $N_1 = \sqrt{\epsilon_1} = n_1 - j\alpha_1$. Так как длина световой волны в кремнии $\lambda_1 = \lambda_0/n_1$, а длина волны в волноводе $\lambda = \lambda_0/\beta$, то условие существования вытекающих мод $2\alpha\beta > \epsilon_1'' = 2\alpha_1 n_1$ можно записать в виде $\alpha\lambda_1 > \alpha_1 \lambda$. Иными словами, мода является вытекающей, если ее затухание $\alpha\lambda_1$ при прохождении пути, равного длине волны в кремнии больше затухания $\alpha_1 \lambda$ этой волны на расстоянии длины волны моды в волноводе.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости ЭПП β трех пар низших мод рассматриваемой системы от толщины h волноводного слоя SiO_2 на длине волны 633 нм. Расчет производился на комплексной плоскости с использованием дисперсионного уравнения трехслойного волновода [3]

$$k_2 h = \operatorname{arctg}\left(E_{23} \frac{k_3}{k_2}\right) \pm \operatorname{arctg}\left(E_{21} \frac{k_1}{k_2}\right) + N\pi. \quad (3)$$

Здесь $k_2 = k_0 \sqrt{\epsilon_2 - \gamma^2}$, $k_3 = k_0 \sqrt{\gamma^2 - \epsilon_3}$ — поперечные волновые числа моды в пленке и воздухе соответственно, $E_{23} = E_{21} = 1$ — в случае TE-мод, $E_{23} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_3}$ и $E_{21} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$ — в случае TM-мод, $N = 0, 1, 2, \dots$ — номер моды. Участки дисперсионных кривых,

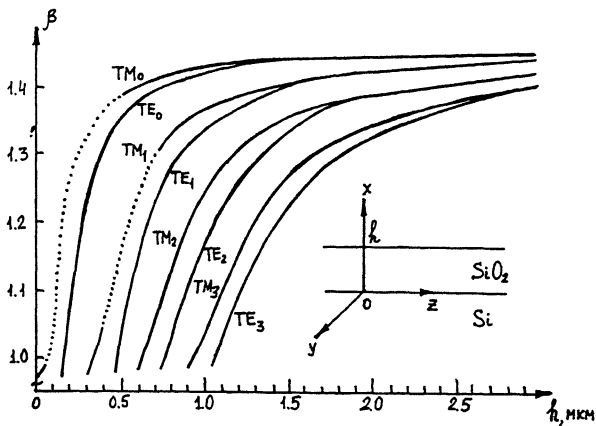


Рис. 1. Зависимость эффективного показателя преломления β от толщины h слоя SiO_2 для низших мод волноводной системы $\text{Si} - \text{SiO}_2$ -воздух. Сплошные линии - поверхностные моды, пунктирные - вытекающие моды.

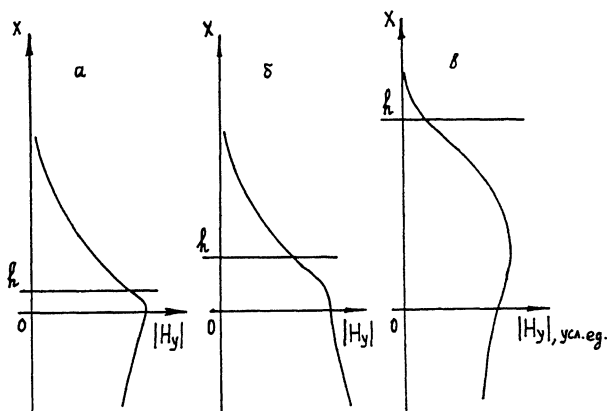


Рис. 2. Зависимость компоненты поля $|H_y|$ моды TM_0 от координаты x для разных толщин h слоя SiO_2 : а) $h = 50$ нм, б) $h = 150$ нм, в) $h = 550$ нм.

показанных на графике штриховыми линиями, соответствуют интервалам толщин слоя SiO_2 , при которых моды являются вытекающими. При расчете дисперсии вытекающих волн второе слагаемое в правой части (3), в соответствии с вышесказанным, бралось со знаком минус. Проведенный нами анализ зависимости $|r(\beta)|$ показывает, что области вытекания мод TM_0 и TM_1 соответствуют интервалам значений β , в которых $|r|$ проходит через минимум.

Заметим, что этот интервал для моды TM_1 ($1.04 < \beta < 1.3$) меньше, чем для моды TM_0 ($0.985 < \beta < 1.39$), а для моды TM_2 он вообще отсутствует. В случае моды TM_2 $|r|$ проходит через минимум при больших чем у мод TM_0 и TM_1 значениях толщины пленки SiO_2 , и у этой моды доля мощности в пленке больше, чем соответствующие доли мощностей мод TM_0 и TM_1 . Поэтому ее коэффициент затухания (1) меньше, так что для нее всегда $\varepsilon_1'' > 2\alpha\beta$, и мода является поверхностной при всех значениях β (рис. 1). На рис. 2 приведены зависимости модуля поля $|H_y|$ моды TM_0 от координаты x для трех значений толщины пленки $h = 50$ нм (а), $h = 150$ нм (б) и $h = 550$ нм (в).

Границы интервалов толщин пленки SiO_2 , при которых мода является вытекающей, можно приближенно определить следующим образом. Для достаточно большой фиксированной толщины пленки SiO_2 по приближенным формулам [3] находим значение ЭПП β для данной моды. Затем с использованием (1) находим величину α . Если неравенство $\varepsilon_1'' > 2\alpha\beta$ выполнено, уменьшаем толщину h и повторяем указанные действия. Толщина h_n , при которой будет достигнут знак равенства, является правой границей интервала. При дальнейшем уменьшении толщины знак неравенства изменится на обратный. Толщина h_n , при которой вновь будет достигнут знак равенства, является левой границей этого интервала. Если неравенство $\varepsilon_1'' > 2\alpha\beta$ выполняется при любой толщине пленки SiO_2 , то мода всегда является поверхностной.

Вытекающие моды могут существовать и в четырехслойной волноводной системе $Si - SiO_2$ -легированный $SiO_2 - SiO_2$ [1]. При расчете такой системы толщина волноводного (легированного) слоя выбиралась равной 8 мкм, толщина буферного слоя t варьировалась как параметр, разность между показателями преломления пленок составляла 0.005; длина волны $\lambda_0 = 1.3$ мкм. Как показывают вычисления, моды TE_0 , TM_0 данной структуры являются вытекающими при $t < 8$ мкм, а моды TE_1 , TM_1 - при $t < 13$ мкм.

Учет спектра вытекающих мод может оказаться необходимым при разработке интегральных оптоэлектронных схем на основе структур волновод-фотодетектор на кремнии [4, 5].

Таким образом, в работе показано, что в волноводной системе $Si - SiO_2$ -воздух моды пленки в определенном интервале толщин SiO_2 могут становиться вытекающими. Установлено, что мода является вытекающей, если ее затухание при прохождении пути, равного длине волны в кремнии больше затухания этой волны на длине волны моды в волноводе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Grand G., Jadot J.P., Denis H., Valette S., Fournier A., Gro-uillet A.M. // Elect. Lett. 1990. V. 26. N 25. P. 2135-2137.

- [2] А н и к и н В.И., Ж и т к о в П.М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 9. С. 89-93.
- [3] Я р и в А., Ю х П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987. 616 с.
- [4] М а к G., Б р у с е D.M., J e s s o p P.E. Appl. Optic. 1989. V. 28. N 21. P. 4629-4636.
- [5] В а б а Т., К о к у б у н Y., W a t a n a - b e H. // J. of Ligh. Technol. 1990. V. 8. N 1. P. 99-104.

Поступило в Редакцию
5 июля 1991 г.