

06.1;06.3

Моделирование формирования микролинз в стеклах при помощи электростимулированного ионного обмена: влияние пространственного заряда

© В.А. Никитин, А.В. Шевченко, Н.А. Яковенко

Кубанский государственный университет, Краснодар
E-mail: saymail@usa.net

Поступило в Редакцию 12 июля 2000 г.

Проанализировано влияние пространственного заряда на формирование микролинз при помощи электростимулированного ионного обмена. Показано, что напряженность электротехнического поля внутри подложки неоднородна и со временем уменьшается. Поскольку скорость электростимулированной миграции зависит от напряженности поля, это приводит к замедлению ионного обмена, и поэтому диаметры микролинз получаются меньше, чем расчетные в случае однородности напряженности внутри подложки.

Ионнообменные микролинзы в стекле находят широкое применение в различных оптоэлектронных устройствах для коллимации, фокусировки, сопряжения оптических каналов [1–2]. Известной технологией для их производства является электростимулированный ионный обмен [1,3,4]. Часто при моделировании различных оптических элементов, изготовленных по данной технологии, пренебрегают наличием пространственного заряда, возникающим из-за различия подвижностей обменивающихся ионов [5]. В данной работе показано, что при изготовлении микролинз диаметром порядка сотен микрометров наличие пространственного заряда внутри стеклянной подложки приводит к значительному замедлению скорости ионного обмена, и поэтому для эффективного моделирования технологического процесса его наличие важно учитывать.

Рассмотрим процесс формирования планарного волновода на стеклянной подложке при помощи электростимулированного ионного об-

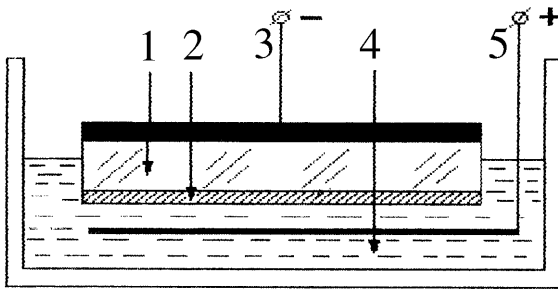


Рис. 1. Схема изготовления планарных волноводов электростимулированным ионным обменом: 1 — стеклянная пластинка, 2 — планарный волновод, 3 — катод, 4 — расплав соли, 5 — анод.

мена в расплаве нитрата некоторого щелочного металла Me^+ (рис. 1). В процессе формирования волноводного слоя ионы натрия Na^+ замещаются щелочными ионами Me^+ из расплава нитрата. Профиль показателя преломления планарного волновода при использовании внешнего поля получается ступенчатый. Разобьем подложку по глубине на две части: волноводную и неволноводную. Поскольку химический состав слоев будет отличаться, то каждая из них будет характеризоваться своим удельным сопротивлением. Пусть d — толщина волновода, h — толщина оставшейся части подложки. Если в процессе электростимулированного ионного обмена к подложке приложено постоянное напряжение U , то часть напряжения — v будет падать на волноводной части. Так как плотность тока в обеих частях одинакова, а удельные сопротивления отличаются, то, следовательно, на границе волновода со стеклом происходит резкое изменение напряженности электрического тока. Это не может быть объяснено неоднородностью диэлектрической проницаемости, поскольку по экспериментальным данным максимальное отличие показателя преломления волновода от исходного стекла порядка десяти процентов, а согласно соотношению Нернста–Эйнштейна, удельное сопротивление может изменяться в десятки-сотни раз. Следовательно, на границе волновод–стекло возникает пространственный заряд, который приводит к изменению напряженности электрического поля.

За промежуток времени δt глубина волноводного слоя d изменится на величину

$$\delta d = \mu E \delta t, \quad (1)$$

где δd — приращение глубины планарного волновода, μ — подвижность щелочных ионов Me^+ , E — напряженность электрического поля в волноводе. Поскольку плотность тока равна $j = U / (\rho_1 d + \rho_2 h)$, где ρ_1 , ρ_2 — удельное сопротивление волноводной части и исходного стекла соответственно, то падение напряжения на волноводном слое

$$v = \frac{U d}{d + (\rho_2 / \rho_1) h}. \quad (2)$$

Отсюда получаем

$$\delta t = \frac{d + (\rho_2 / \rho_1) h}{\mu U} \delta d. \quad (3)$$

Интегрируя (3) и решая квадратное уравнение, получаем

$$d = [(h\rho_2 / \rho_1)^2 + 2\mu U t]^{0.5} - h\rho_2 / \rho_1. \quad (4)$$

Из полученной зависимости (4) видно, что глубина волновода зависит от времени и величины прикладываемого напряжения нелинейным образом. На рис. 2 представлены экспериментальные данные зависимости глубины планарного волновода от величины прикладываемого напряжения, полученные в стеклянной подложке при проведении электростимулированного ионного обмена с расплавом AgNO_3 .

При помощи метода наименьших квадратов экспериментальные данные были аппроксимированы линейной функцией и зависимостью (4). Согласно традиционному подходу, в котором считается, что поле внутри подложки однородно, линейная зависимость должна при нулевом напряжении давать нулевую глубину волновода, поскольку профиль показателя преломления ступенчатый. Однако прямая пересекается ординат гораздо выше нуля. С другой стороны, выражение (4) хорошо описывает полученную экспериментальную зависимость и при отсутствии внешнего поля и принимает близкое к нулю значение. Ошибка аппроксимации в обоих случаях составляет около $0.5 \mu\text{m}$. Формула (4) качественно согласуется с результатами, представленными в работах [5–6].

Согласно (4), величина напряженности электрического поля с течением времени уменьшается. При формировании микролинз их толщина

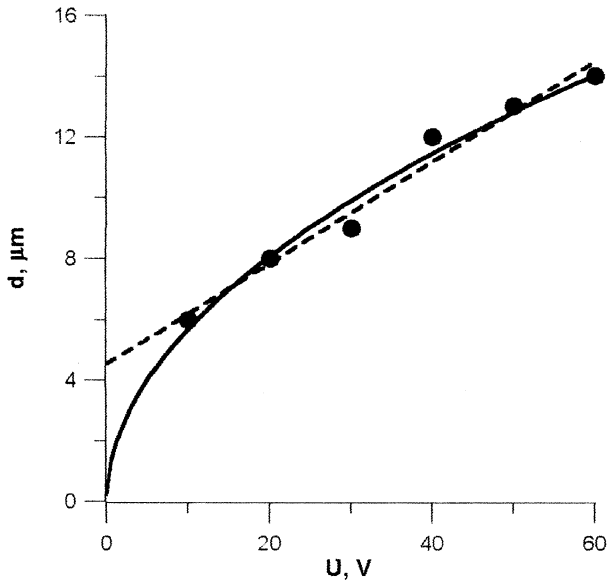


Рис. 2. Типовая зависимость глубины планарного волновода от величины прикладываемого напряжения U . Кружками обозначены экспериментальные точки, пунктирная линия — аппроксимация линейной функцией, непрерывная линия — аппроксимация с использованием зависимости (4).

может достигать сотен микрометров на подложке порядка одного миллиметра. При замещении в стеклянной подложке ионов натрия Na^+ ионами серебра Ag^+ отношение $k = \rho_1/\rho_2$, согласно литературным данным [7], может принимать значения больше 10. Поэтому при $d = 300 \mu\text{m}$, $h = 1 \text{ mm}$, $k = 10$ напряженность поля будет отличаться от первоначальной примерно в 4 раза. Это приводит, согласно (1), к значительному замедлению скорости ионного обмена.

В случае $v \gg (U - v)$ для (4) справедлива аппроксимация

$$d = (2\mu U t)^{1/2}. \quad (5)$$

При диаметре микролинз, на порядок превосходящем диаметр отверстия в металлической маске, приближенно можно считать, что поле

сферически симметрично. В этом случае при постоянстве электрического поля радиус микролинзы пропорционален $t^{1/3}$, где t — время формирования [8]. Однако если учесть, что поле уменьшается с течением времени, то, согласно (5), радиус должен быть приближенно пропорционален $t^{1/6}$. Так, по экспериментальным данным [8] величина эффективного поля на порядок меньше приложенного. Это отклонение хорошо объясняется наличием пространственного заряда, вследствие чего происходит уменьшение напряженности электрического поля со временем.

Таким образом, в данной работе показано, что при формировании электростимулированным ионным обменом микролинз необходимо учитывать влияние пространственного заряда, поскольку это приводит к значительному замедлению скорости ионного обмена.

Список литературы

- [1] Iga K., Misava S. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 19. P. 3388–3396.
- [2] Asako Sasaki et al. // Jpn. J. Appl. Phys. V. 31. N 5B. P. 1611–1617.
- [3] Иванов В.Н. и др. // ЖТФ. 1983. Т. 53. № 10. С. 2088–2089.
- [4] Гладкий и др. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22. № 10. С. 1027–1033.
- [5] Pantchev B., Nikolov Z. // IEEE. J. Quantum Electron. 1992. V. 29. N 1. P. 154–160.
- [6] Dong Cheng et al. // Optics Comm. 1997. V. 137. N 5. P. 233–238.
- [7] Ramaswamy R.V., Srivastava R. // J. Lightwave Technol. 1988. V. 6. P. 984–1001.
- [8] Masahio Oikawa et al. // Appl. Opt. 1984. V. 23. N 11. P. 1787–1789.