

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ МНОГОМОДОВЫХ ПЛАНАРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯ МОДЫ

В. И. Борисов, Г. П. Куканков, А. В. Томов

Профиль показателя преломления (ППП)  $n(x)$  является важной характеристикой планарных оптических волноводов и определяется в основном методами, основанными на расчете «поворотных» точек  $x'_m$  по известному спектру волноводных показателей преломления  $n_m$  мод [1, 2]. Эти методы отличаются простотой проведения измерений и хорошо описывают ППП вблизи подложки. Но при их использовании необходимо предварительно задавать величину показателя преломления  $n(0)$  на поверхности волновода, которая сильно влияет на точность восстановления ППП вблизи поверхности волновода. Существующие рекомендации по выбору оптимальной величины  $n(0)$  основаны на минимизации кривизны оцениваемого профиля и не всегда обеспечивают необходимую точность расчета  $n(x)$  [1]. При таком подходе к восстановлению ППП локальные изменения монотонности профиля сглаживаются. Для волноводов, у которых максимальное значение показателя преломления расположено не на поверхности, не всегда возможно измерение всего спектра мод и соответственно восстановление их ППП указанными методами. В работе [3] предлагается непосредственно измерять положение «поворотных» точек по распределению полей всех мод. Недостатками этого метода являются неопределенность критерия выбора положения поворотных точек и необходимость знания всего спектра волноводных показателей преломления  $n_m$ . В настоящей работе исследуется возможность определения ППП многомодовых оптических волноводов по поперечному распределению интенсивности поля одной моды.

Рассмотрим планарный волновод с профилем показателя преломления  $n(x)$ . Известно, что поперечное распределение электрического поля  $TE$  моды между «поворотными» точками в ВКБ приближении можно записать в виде [4]

$$E_m(x) \sim \cos \left[ \int_0^x \sqrt{n^2(x) - n_m^2} dx - \Phi_m \right], \quad 0 < x < x'_m, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $m = 0, 1, 2 \dots$  — номер моды,  $\lambda$  — длина волны возбуждающего излучения,

$$\Phi_m = \arctg \sqrt{\frac{n_m^2 - 1}{n^2(0) - n_m^2}}. \quad (2)$$

Обозначим, начиная от поверхности волновода, через  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_m$  точки, в которых  $E_m(x) = 0$ . Тогда из (1) получим

$$\int_0^{x_1} k \sqrt{n^2(x) - n_m^2} dx = \Phi_m + \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

$$\int_{x_j}^{x_{j+1}} k \sqrt{n^2(x) - n_m^2} dx = \pi, \quad j = 1, 2 \dots m-1. \quad (4)$$

Применим ступенчатую аппроксимацию  $n(x)$ ; в каждом из интервалов  $x_j < x < x_{j+1}$  из (4) получим значение показателя преломления  $n(\Delta x_j)$  на этом интервале

$$n(\Delta x_j) = \sqrt{n_m^2 + \left( \frac{\lambda}{2\Delta x_j} \right)^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta x_j = x_{j+1} - x_j$ . Можно предположить, что это значение совпадает с истинным значением или по крайней мере близко к нему в точке, расположенной в центре интервала  $(x_j, x_{j+1})$ . Учет изменения фазы поля моды на интервале  $0 < x < x_1$  в предположении ступенчатой аппроксимации  $n(x) = [n(0) + n(\Delta x_1)]/2$  на этом участке волновода позволяет приближенно определить величину  $n(0)$  из следующего уравнения:

$$\pi + \arctg \sqrt{\frac{n_m^2 - 1}{n^2(0) - n_m^2}} = k \left( x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2} \right) \sqrt{\left[ \frac{n(0) + n(\Delta x_1)}{2} \right]^2 - n_m^2}. \quad (6)$$

Полученное из (6) значение  $n(0)$  можно использовать для определения показателя преломления на интервале  $(0, x_1)$ .

Таким образом, зная положения точек, в которых интенсивность поля моды равна нулю, волноводный показатель преломления этой моды, можно восстановить ППП волновода.

Для экспериментальной проверки метода использовался 14-модовый эффузионный волновод, образованный в стекле ЛК-1 [5]. Возбуждение мод волновода осуществлялось излучением He—Ne лазера посредством призмы ввода, а распределение интенсивности поля моды по поперечному сечению волновода фотографировалось микрофотонасадкой с использованием 40-кратного объектива и 15-кратного окуляра. Масштаб изображения определялся объектив-микронетром с ценой деления 10 мкм. Волноводные показатели преломления мод измерялись призмевым методом с точностью не хуже  $10^{-4}$ .

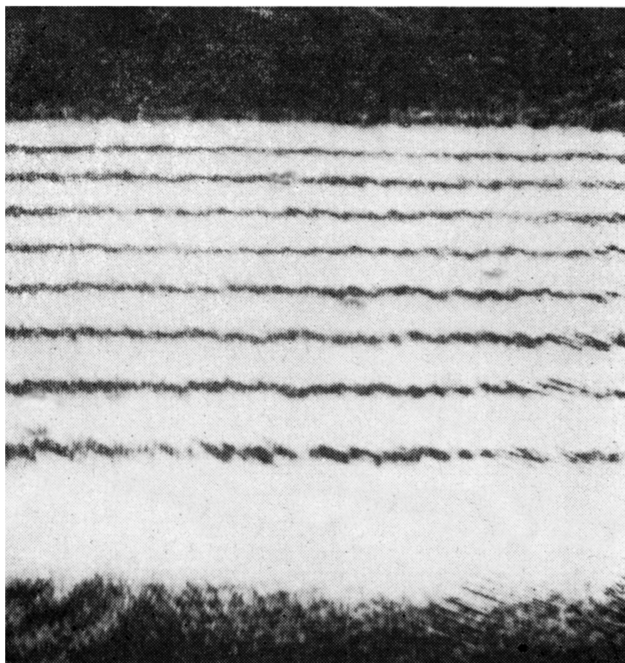


Рис. 1. Фотография распределения интенсивности поля моды ( $m=8$ ).

На рис. 1 приведена фотография распределения поля моды ( $m=8$ ), на которой хорошо видны темные линии минимальной интенсивности поля, расстояние между которыми уменьшается по мере приближения к поверхности волновода. Очевидно, что для достижения достаточной точности определения положений нулевых значений интенсивности поля необходима статистическая обработка изображения, которая проводилась с использованием анализатора изображения на основе ЭВМ ЕС 1010 с универсальным внешним устройством [6]. При такой обработке среднеквадратичная ошибка  $\sigma$  определения величин  $\Delta x_j$  не превышала 0.03 мкм.

На рис. 2 приведен ППП исследованного волновода, полученный по расчету «поворотных» точек на основании спектра мод и по распределению интенсивности полей двух различных мод. Величина показателя преломления  $n(0)$  не определялась из-за недостаточной точности определения положения края волновода. Видно хорошее соответствие профилей, полученных разными методами. Оказалось, что на глубине порядка 10 мкм от поверхности волновода наблюдается локальное изменение монотонности  $n(x)$ , что видно при восстановлении по распределению поля, а также более слабо наблюдается при построении по «поворотным» точкам, находящимся вблизи этой области волновода. Исследования показали, что среднеквадратичная ошибка определения  $n(\Delta x_j)$  при достигнутой точности определения  $\Delta x_j$  не превышает величины  $6 \cdot 10^{-4}$  при  $m=14$ . Для уменьшения этой ошибки необходимо увеличи-

вать точность измерения  $\Delta x_j$ , что может быть достигнуто, например, уменьшением шага считывания анализатора изображения.

Применимость предложенного метода для определения ППП волновода, максимальное значение показателя преломления которого не лежит на поверхности, проверялась на теоретической модели ППП вида  $n(x) = n_s + \Delta \exp[-(x-d)^2/a^2]$  по данным из работы [4]. Для одной из мод этого волновода были рассчитаны положения точек, в которых поле равно нулю, и затем по этим точкам восстанавливался ППП. На рис. 3 приведен результат этого восстановления. Видно, что предложенный метод может быть применим для восстановления ППП волноводов указанного типа с удовлетворительной точностью. Показатель преломления на поверхности волновода, определенный по формуле (6), отличался от истинного на величину  $8 \cdot 10^{-4}$ .

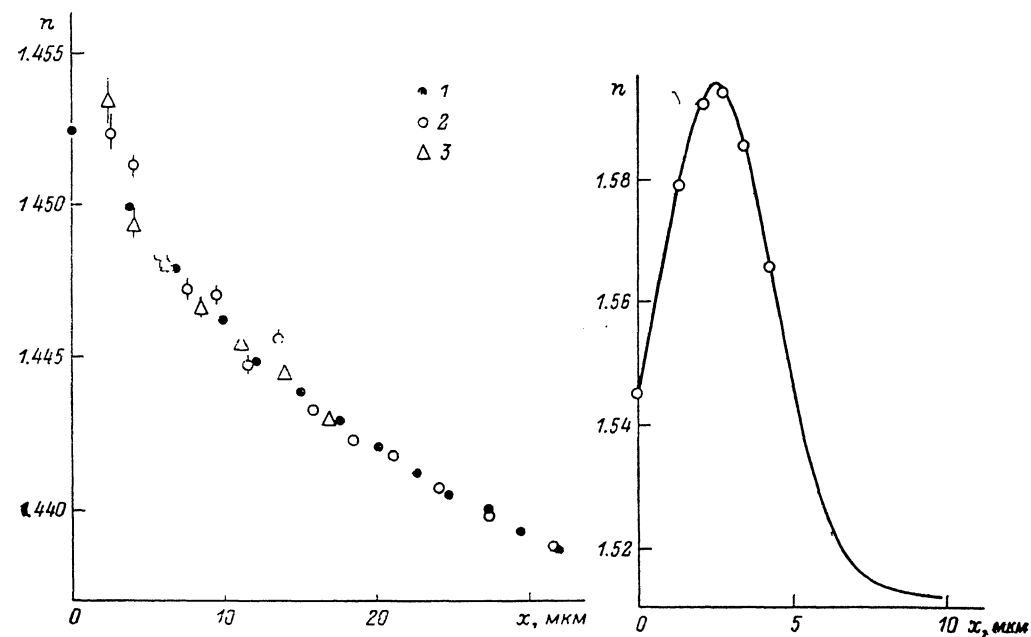


Рис. 2. Результаты восстановления ППП эффузионного волновода расчетом «поворотных» точек (1) по спектру мод и расчетом по нулям поля для мод  $m=14$  (2) и  $m=8$  (3).

Рис. 3. Восстановление загубленного ППП (по данным работы [4]) предлагаемым методом (точки).

Линией показан истинный ППП.

Таким образом, показана возможность практической реализации восстановления ППП многомодовых планарных волноводов по распределению интенсивности поля одной из мод. При этом нет необходимости в предварительном задании значения показателя преломления  $n(0)$  на поверхности волновода и в проведении сглаживающих профилей минимизаций. Расчет показателя преломления в каждом из интервалов  $\Delta x_j$  производится независимо от величин  $\Delta x_{j-1}$ ,  $\Delta x_{j+1}$ . Поэтому можно утверждать, что предлагаемый метод более чувствителен к локальным изменениям монотонности ППП. Кроме того, проведение измерений для нескольких мод волновода значительно увеличивает число точек восстанавливаемого ППП, часть из которых находится ближе к поверхности волновода, чем «поворотная» точка для нулевой моды. Таким образом, появляется возможность более точного описания поведения  $n(x)$  в приповерхностной области волновода и всего профиля в целом. Получаемые в процессе измерений данные позволяют также восстанавливать ППП волноводов, у которых максимальное значение показателя преломления расположено не на поверхности, при условии возбуждения хотя бы одной (высшей) моды волновода и измерения ее волноводного показателя преломления.

- [1] White J. M., Heidrich P. F. Appl. Opt. 1976, v. 15, N 1, p. 151—155.  
 [2] Аксенов Е. Т., Липовский А. А. ЖТФ, 1980, т. 50, № 4, с. 842—844.  
 [3] Viljanen J., Kurki J. Appl. Opt., 1982, v. 21, N 23, p. 4321—4323.  
 [4] Gedeon A. Opt. Commun., 1974, v. 12, N 3, p. 329—332.  
 [5] Редько В. П., Шляхтичев О. Д. Письма в ЖТФ, 1978, т. 4, № 23, с. 1414—1416.  
 [6] Козлов В. С. Приборы и техника эксперимента, 1983, № 4, с. 233—234.

Институт физики АН БССР  
 Могилевское отделение

Поступило в Редакцию  
 2 декабря 1986 г.

УДК 537.528

Журнал технической физики, т. 58, в. 6, 1988

## О ПРИРОДЕ АНОДНЫХ СТРИМЕРОВ В ВОДЕ

П. Г. Петров, В. Р. Кухта, В. В. Лопатин

Процесс формирования разрядных каналов (стримеров) в конденсированной среде, находящейся под воздействием внешнего электрического поля, традиционно рассматривался как развитие зоны ионизации, распространяющейся от электрода в глубь промежутка. Для объяснения явления ионизации в нано- и микросекундном диапазоне экспозиций напряжения привлекаются самые разнообразные механизмы. Отметим самые популярные: авто- и ударной ионизации [1, 2], пузырьковый [3], ионизационных волн [4]. В настоящей ра-

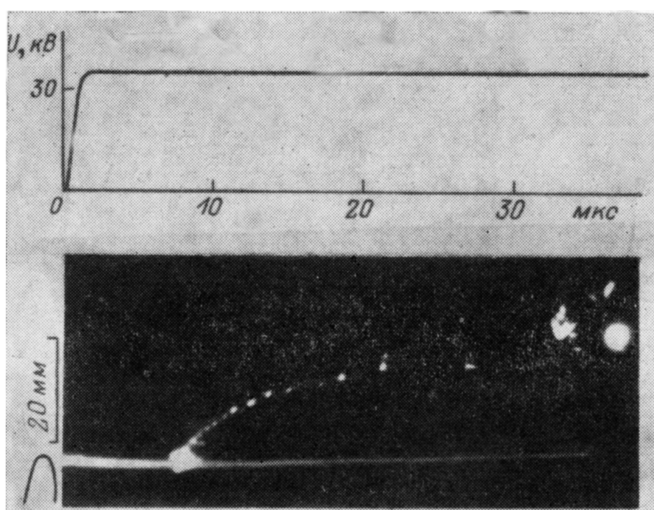


Рис. 1. Хронограмма собственного свечения разряда.

боте приводятся экспериментальные данные, не имеющие удовлетворительного объяснения в рамках существующих моделей. Предлагается новая модель анодного стримера, основные положения которой согласуются с известными экспериментальными данными.

Исследования поведения воды с проводимостью  $\sigma = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$  проводились в электродной системе острый анод—плоский катод. Расстояние между электродами 60 мм, радиус острия 200 мкм, диаметр плоскости 60 мм. На промежуток подавался импульс с длительностью переднего фронта  $\sim 10^{-7}$  с и спадом до половины амплитуды  $\sim 10^{-3}$  с. Значение напряженности электрического поля в районе острия варьировалось в пределах  $5 \cdot 10^6$ — $10^8$  В/м. На рис. 1 представлена фотохронограмма свечения разряда в приострийной области, полученная с помощью ЭОП. Хорошо видно, что свечение не сопровождает непрерывно рост стримеров, что вызывает сомнения о правомерности привлечения механизмов авто-