

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ И ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

О.В. Богданкевич, А.Н. Георгобиани, С.А. Дарзнек, Е.А. Железникова,
В.Г. Солин, П.А. Тодуа

УДК 621.372.826

Методом пространственной модуляции отражения света определены профили показателя преломления и линейные размеры слоев в сечении оптического волокна и полупроводниковой лазерной гетероструктуры на основе $Ga_{1-x}Al_xAs$.

При нормальном падении монохроматического излучения на поверхность раздела двух диэлектрических сред с показателями преломления $n_1 = 1$ и $n_2 = n$ значение коэффициента отражения определяется формулой /1/

$$R = [(n - 1)^2 + k^2] / [(n + 1)^2 + k^2], \quad (1)$$

где $k = \alpha\lambda/4\pi$ — коэффициент экстинкции, α — коэффициент поглощения, λ — длина волны излучения.

Из (1) следует, что по измеренному экспериментально коэффициенту отражения можно определить искомое значение показателя преломления. В случае прозрачной ($\alpha = 0$, $k = 0$), а также слабо- или даже сильнопоглощающей среды, но при выполнении условия $k^2 \ll (n - 1)^2$

$$n = (1 + R^{1/2}) / (1 - R^{1/2}). \quad (2)$$

Если же вкладом коэффициента экстинкции пренебречь нельзя, то

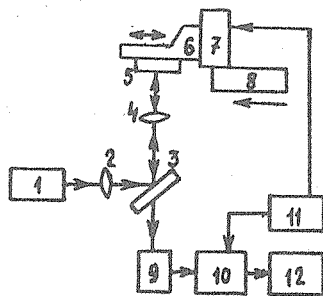
$$n = \frac{1 + R}{1 - R} + \left[\left(\frac{1 + R}{1 - R} \right)^2 - (1 + k^2) \right]^{1/2} \quad (3)$$

Сканируя нормально падающим остросфокусированным световым пучком поверхность образца или, при неподвижном световом зонде, перемещая образец в плоскости, перпендикулярной к падающему пучку, можно последовательно определять значения коэффициента отражения вдоль направления сканирования. Не представляет труда привести полученный профиль коэффициента отражения в однозначное соответствие с искомым профилем показателя преломления, используя соотношения (2) или (3). При этом в качест-

ве исследуемой поверхности выбирается нормальное сечение световода или сечение многослойной полупроводниковой структуры плоскостью, нормальной к ростовой поверхности. Эта поверхность не должна содержать царапин, фигур травления и иных дефектов, искажающих данные о коэффициенте отражения. Наиболее качественной поверхностью в этом смысле является скол.

При определении оптических параметров волокон /2,3/ и многослойных гетероструктур /4/ абсолютная погрешность измерения размеров областей с различными показателями преломления (сердцевины волокна, слоев гетероструктуры) определяется известным критерием пространственного разрешения Рэлея и в лучшем случае составляет ~ 1 мкм. Кроме того, пороговая чувствительность такого прямого метода измерения Δn во многом определяется собственными шумами источника и приемника света.

Значительного повышения чувствительности при измерении профиля n и точности определения границ слоев позволяет добиться метод пространственной модуляции отражения света /4/. В этом случае (см. рис. 1) свет от источника монохроматического света 1 фокусируется на поверхность образца 5, который наряду со сравнительно медленным поступательным перемещением в плоскости, перпендикулярной к падающему пучку, приводится еще и в быстрое колебательное движение с малой амплитудой вдоль того же направления. В отклике фотоприемника 9 содержатся две составляющие: одна постоянная, пропорциональная значению R в данной точке, а вторая — перемен-

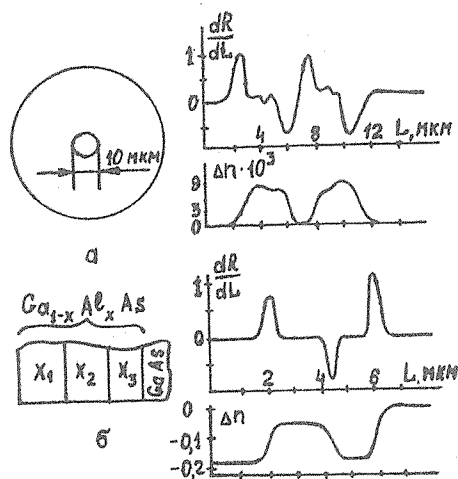


Р и с. 1. Блок-схема модуляционного измерения профиля показателя преломления: 1 — источник монохроматического света, 2 — фокусирующая оптика, 3 — полупрозрачная пластинка, 4 — микробиъектив, 5 — исследуемый образец, 6 — держатель образца, 7 — вибратор (пьезокерамика), 8 — платформа с поступательным перемещением, 9 — фазочувствительный нановольтметр, 10 — фазочувствительный нановольтметр, 11 — генератор, 12 — самопишущий потенциометр

ная, с амплитудой, пропорциональной производной от R по координате. Амплитудное значение переменной составляющей выделяется и усиливается фазочувствительным нановольтметром 10 и далее регистрируется самопишущим потенциометром 12. Медленное по сравнению с частотой колебаний поступательное перемещение образца позволяет непрерывно снимать зависимость dR/dL от текущей координаты в отражающей плоскости L .

На рис. 2 приведены схематические изображения исследовавшихся лазерной многослойной гетероструктуры на основе $Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs$ ($T = 300$ К) и кварцевого световода, а также дифференциальные кривые отражения и восстановленные по ним профили показателя преломления (зависимости приращений показателя преломления от координаты).

Как отмечалось выше, амплитудное значение переменной составляющей в выходном сигнале фотоприемника $U_0(L)$ пропорционально производной от коэффициента отражения по координате $dR/dL = AU_0(L)$, где A — нормировочный коэффициент. Значение $R(L)$ в каждой точке сечения волновода или структуры вдоль направления сканирования дается выражением $R(L) = R(L_0) + A \int_{L_0}^L U_0(L) dL$, где L_0 — координата начала отсчета, например, точки вблизи края образца.



Р и с. 2. Результаты измерения параметров световода (а) и трехслойной гетероструктуры на основе $Ga_{1-x}Al_xAs-GaAs$ (б)

Для определения нормировочного коэффициента A воспользуемся тем обстоятельством, что нам известны значения коэффициента отражения (показатель преломления и коэффициент поглощения) по крайней мере в двух точках исследуемой поверхности, а именно: $R(L_0) = 0$, $R(L_1) = R_1$, где L_1 — координата любой точки, лежащей на подложке либо в оболочке световода. Тогда $A = [R_1 - R(L_0)] / \int_{L_0}^{L_1} U_0(L) dL$. Таким образом, по дифференциальной кривой отражения определяется зависимость $R(L)$ либо $\Delta R(L) = R(L) - R(L_0)$ и далее при использовании соотношений (2) или (3) восстанавливается профиль показателя преломления. Следует подчеркнуть, что в экспериментально измеренном дифференциальном сигнале отражения присутствует полная информация о показателе преломления, в то время как использование формулы (2) вместо (3) для пересчета профиля коэффициента отражения в профиль показателя преломления вносит определенную методическую ошибку в такой пересчет.

Для исследовавшихся образцов световода и трехслойной гетероструктуры (см. рис. 2) определение профиля показателя преломления производилось по формуле (2), не учитывая поглощения в среде ($k = 0$). Длина волны излучения составляла $\lambda = 0,633$ нм, при этом для GaAs $a \approx 4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1} / l$, что соответствует $k' = 0,2$. В случае же световода a тем более не вносит существенного вклада в расчет.

Надо отметить, что в дифференциальных кривых четко видны особенности поведения показателя преломления. В случае световода максимальное приращение показателя преломления составляет $\Delta n = 0,009$. Видно, что в центральной области сердцевинки наблюдается провал показателя преломления до значения, соответствующего значению показателя преломления оболочки. Протяженность области провала вдоль диаметра световода, определенная по полувысоте, составляет 2 мкм при диаметре сердцевинки ~ 10 мкм.

Линейные размеры областей с различными показателями преломления измеряются достаточно просто по расстояниям между экстремумами модуляционной кривой. Абсолютная погрешность таких измерений не превышает 0,05 мкм, если толщина слоя более 0,4 мкм. Как видно из результатов измерения параметров гетероструктуры, ее профиль имеет ступенчатую форму с достаточно большой вариацией значений n (до десяти процентов), а толщина волноводного слоя составляет $2,95 \pm 0,05$ мкм.

Поступила в редакцию 5 апреля 1984 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ж. Панков, Оптические процессы в полупроводниках, "Мир", М., 1973 г.
2. W. Eickhoff, E. Weidel, Optical and Quantum Electronics, 7, 109 (1975).
3. M. Ikeda, M. Tateda, Appl. Optics, 14, 814 (1975).
4. А.Н. Георгобиани, Л.Н. Иванов, П.А. Тодуа, Материалы III Республиканского коллоквиума, Сухуми, 18 – 24 октября 1979 г. Мецнизреба, Тбилиси, 1980 г., с. 15.