

М. Л. Белов, А. М. Белов,
В. А. Городничев, В. И. Козинцев,
Ю. В. Федотов

ЛАЗЕРНЫЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКИХ ПЛЕНОК В ПРОЦЕССЕ ИХ РОСТА

Описан метод лазерной рефлектометрии, позволяющий проводить in-situ измерения толщины и показателей преломления и поглощения тонких пленок в процессе их роста. Метод основан на измерении коэффициентов отражения системы воздух (вакуум)–пленка–подложка. Для численного решения использован генетический алгоритм поиска минимума функции нескольких переменных. Приведены результаты математического моделирования, показывающие работоспособность метода.

E-mail: ekomonit@bmstu.ru

Ключевые слова: тонкая пленка, рост, толщина, оптические характеристики, лазерная рефлектометрия.

Производство большинства современных микроэлектронных изделий базируется на использовании методов планарно-эпитаксиальной технологии, основой которой является создание тонких полупроводниковых, диэлектрических и металлических слоев на поверхности полупроводников в целях получения большого числа как активных, так и пассивных микроструктур на одной пластине. Контроль толщины поверхностных слоев в процессе их создания — это одно из условий получения качественных и надежных микроэлектронных устройств.

Специфика полупроводниковой технологии требует применения локальных, бесконтактных, неразрушающих методов контроля, исключающих загрязнение и повреждение даже очень малых областей микроэлектронных структур. С этой точки зрения наиболее удобны и перспективны оптические методы. Оптические свойства материала (спектральные характеристики показателя преломления и показателя поглощения) могут являться прямой или косвенной характеристикой и неоптических параметров исследуемого материала или технологического процесса производства этого материала. Оптические методы могут применяться в широком диапазоне температур, в условиях вакуума, при высоких давлениях, в агрессивных внешних средах, в различных газах и жидкостях. Достоинством оптических методов также является принципиальная возможность автоматизации процесса измерения и совместного использования их с другими методами измерения.

В настоящее время существует множество методов для измерения толщины тонких пленок на подложках: интерференционные ме-

тоды, методы эллипсометрии [1–3], рентгеновской дифрактометрии [4], фурье-спектроскопии [5, 6] и др. Разработанная на их основе аналитическая аппаратура позволяет измерять толщину пленок от единиц (и даже менее) нанометров до сотен нанометров (и более). Основные недостатки существующих приборов — сложность (а следовательно, большая стоимость) и трудность создания встраиваемой технологической аналитической аппаратуры.

Лазерный рефлектометрический метод измерения толщины тонких прозрачных пленок на подложке более простой (по сравнению с перечисленными методами) и использует только информацию о коэффициенте отражения трехслойной системы “воздух (вакуум)–пленка–подложка”.

В описываемом методе используется перпендикулярное падение лазерного луча на подложку с пленкой, что в большинстве случаев упрощает применение данного метода во встраиваемой в технологическое оборудование аналитической аппаратуре. Измерения проводятся только на одной длине волны зондирования (в отличие, например, от методов, описанных в работах [7, 8]).

Существенным является использование в настоящей работе не результатов серии измерений (за большой промежуток времени) при изменяющейся толщине (росте) пленки для определения ее оптических характеристик и скорости роста [9, 10], а результатов нескольких измерений, близких по времени (за короткий промежуток времени).

Такая особенность метода позволяет контролировать характеристики пленок без информации о предыстории роста пленки.

Считаем, что излучение с длиной волны λ падает из воздуха (вакуума) вертикально вниз на систему “пленка–подложка” с плоскопараллельными границами (рис. 1). Подложка имеет большую толщину, так что отражением от нижней ее поверхности можно пренебречь.

Положим показатель преломления воздуха равным единице, $n_0 = 1$, а показатель поглощения — равным нулю, $k_0 = 0$. Тогда коэффициент отражения системы “воздух (вакуум)–пленка–подложка” $V(\lambda)$ в

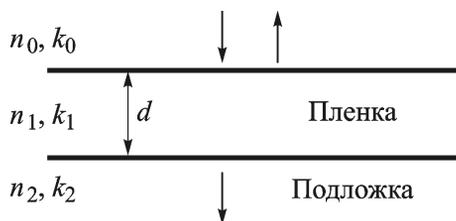


Рис. 1. Схема измерения

зависимости от длины волны λ равен [11]

$$V(\lambda) = \frac{(m_1 + m_2)(1 - m_1) + (m_1 - m_2)(1 + m_1) \cdot e^{i \cdot 4\pi \frac{d}{\lambda} m_1}}{(m_1 + m_2)(1 + m_1) + (m_1 - m_2)(1 - m_1) e^{i \cdot 4\pi \frac{d}{\lambda} m_1}}, \quad (1)$$

где $m_1 = n_1 + ik_1$; $m_2 = n_2 + ik_2$; n_1, k_1 и n_2, k_2 — показатели преломления и поглощения пленки и подложки на длине волны λ .

Отраженное излучение регистрируется приемником измерителя. Регистрируемая мощность $P_{ref}(\lambda)$ на длине волны λ равна (приемный объектив перехватывает все отраженное излучение)

$$P_{ref}(\lambda) = K(\lambda) P_0(\lambda) R, \quad (2)$$

где $R = |V(\lambda)|^2$; $P_0(\lambda)$ — мощность источника излучения на длине волны λ ; $K(\lambda)$ — пропускание приемной оптической системы на длине волны λ .

Отсюда коэффициент отражения R на длине волны λ может быть определен как

$$R = \frac{P_{ref}(\lambda)}{K(\lambda) P_0(\lambda)}. \quad (3)$$

Мощность источника излучения может быть измерена с использованием дополнительного измерительного канала, а пропускание оптической приемной системы можно оценить при помощи дополнительных калибровочных измерений, например, от чистой (без пленки) поверхности подложки.

Считаем, что оптические характеристики подложки n_2, k_2 известны. Оптические характеристики пленки n_1, k_1 в общем случае могут быть неизвестными или известными неточно и их надо определять. Неизвестной является и толщина пленки d , которая в произвольный момент времени t_0 и в коротком промежутке времени, следующем за t_0 (в этом промежутке времени проводится несколько близких по времени измерений коэффициента отражения R), может быть представлена в виде некоторой модели, например

$$d = d_0 + (t - t_0)d_1 \quad (4)$$

или

$$d = d_0 + (t - t_0)d_1 + (t - t_0)^2 d_2, \quad (5)$$

где $d_0 = d(t_0)$; $t > t_0$.

Таким образом, коэффициент отражения R будет зависеть от четырех неизвестных параметров — n_1, k_1, d_0, d_1 (для модели (4) роста пленки) или от пяти неизвестных параметров — n_1, k_1, d_0, d_1, d_2 (для модели (5) роста пленки).

ний (6). Таким образом, квазирешение находится из условия

$$\rho \left(R_{mod} \left(t_i, \tilde{X} \right), R_{meas} \left(t_i \right) \right) = \inf_{X \in M} \rho \left(R_{mod} \left(t_i, X \right), R_{meas} \left(t_i \right) \right), \quad (8)$$

где $\rho(R_1, R_2)$ — расстояние между элементами R_1 и R_2 ; $\inf_{X \in M} \rho$ — точная нижняя граница величины ρ при различных значениях вектора параметров X , принадлежащих области M (области, ограниченной значениями параметров d_0, d_1, n_1, k_1 , определяемыми физическим смыслом решаемой задачи).

Таким образом, задача подбора квазирешения системы уравнений (6) может быть сведена к поиску минимума функции $E(d_0, d_1, n_1, k_1)$ на некоторой ограниченной области значений параметров d_0, d_1, n_1, k_1 , определяемой физическим смыслом решаемой задачи.

Вид функции невязки $E(d_0, d_1, n_1, k_1)$ для $\lambda = 0,532$ мкм, $n_2 = 1,52$, $k_2 = 0$ (подложка из стекла) показан на рис. 2, а при $d_0 = 0,1$ мкм, $d_1 = 0,01$ мкм/с, а на рис. 2, б — для $k_1 = 0,1$ при $d_1 = 0,01$ мкм/с.

Из рис. 2 следует, что функция невязки имеет сложный вид и на области поиска она может иметь более одного локального минимума. Для поиска глобального минимума в этом случае может быть использован генетический алгоритм (ГА) [14, 15].

Генетические алгоритмы — это поисковые алгоритмы, позволяющие с высокой эффективностью решать сложные оптимизационные задачи. При построении данных алгоритмов для организации процедур поиска оптимальных решений используется имитация механизмов наследственности, размножения и естественного отбора, которым подчиняется эволюционное развитие живых организмов на Земле, а также применяются методы, аналогичные используемым в селекции и генной инженерии.

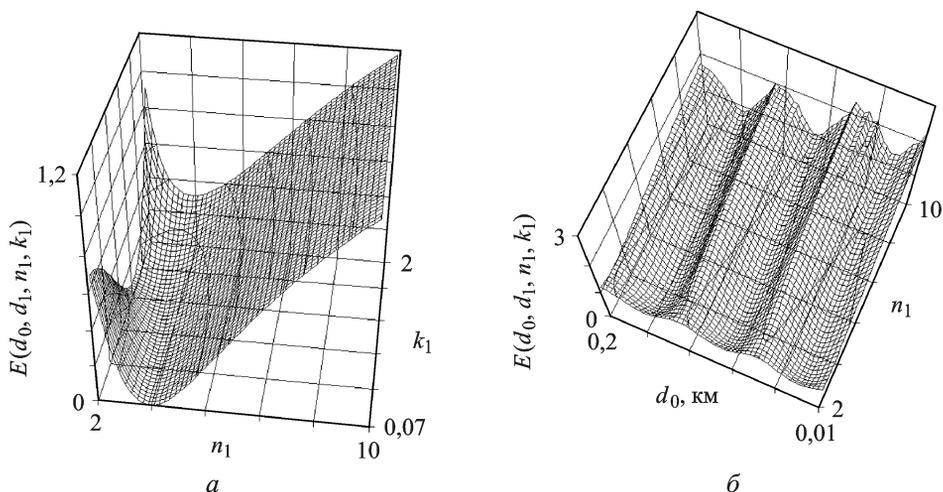


Рис. 2. Функция невязки в координатах n_1, k_1 (а) и d_0, n_1 (б)

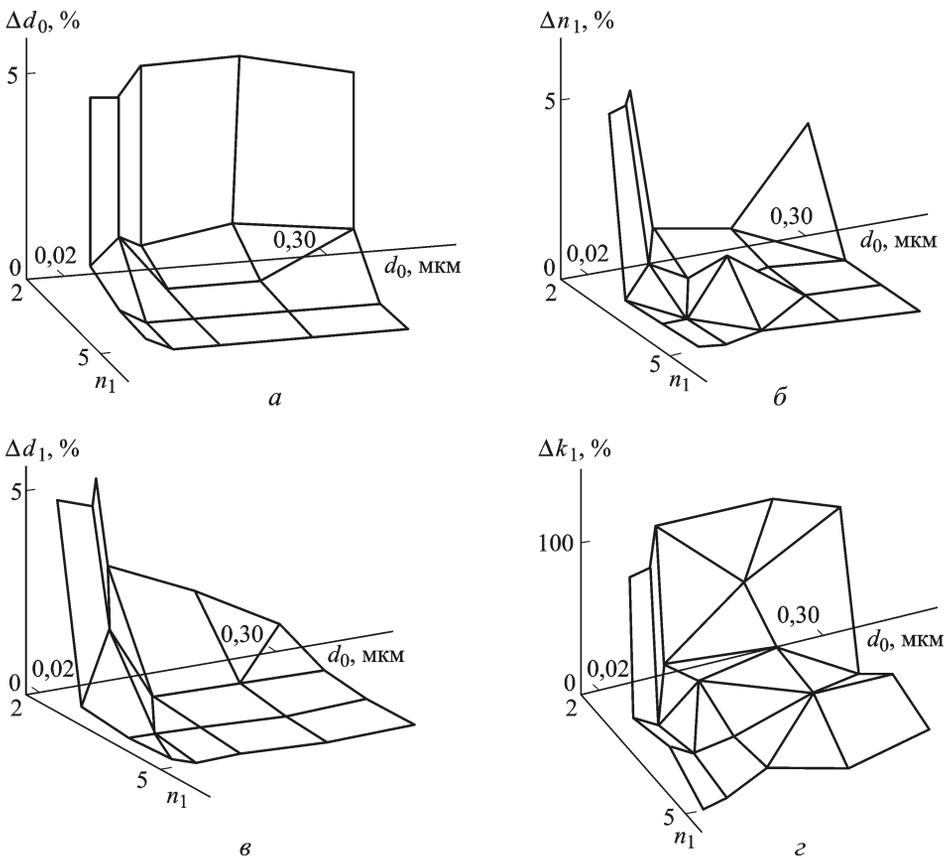


Рис. 3. Относительные погрешности (в процентах) определения толщины пленки Δd_0 (а), показателя преломления пленки Δn_1 (б), скорости роста пленки Δd_1 (в) и показателя поглощения пленки Δk_1 (г)

Для задачи поиска экстремумов функций многих переменных ГА по сути представляют собой методы параллельного поиска глобального экстремума функций, основанные на использовании на каждом шаге своей работы сразу нескольких закодированных определенным образом точек (кандидатов на решения), которые образуют популяцию, развивающуюся по случайным законам в течение многих поколений.

Для проверки работоспособности и оценки эффективности разработанного метода измерения толщины и показателя преломления пленки было проведено математическое моделирование. Моделирование проводилось для модели (4) роста пленки, длины волны излучения $\lambda = 0,532$ мкм и подложки со следующими оптическими характеристиками: $n_2 = 1,52$, $k_2 = 0$. Число измерений $n = 8$, интервал между измерениями — 1 с.

Область поиска составляла: от 0 до 0,5 мкм — по начальной толщине пленки d_0 ; от 0 до 0,05 мкм/с — по скорости роста пленки d_1 ; от 1,5 до 5 — по показателю преломления пленки n_1 , от 0 до 5 — по показателю поглощения пленки k_1 .

Поиск решения останавливался либо через 100 поколений, либо когда за последние 10 поколений относительное изменение (между поколениями) функции невязки не превышало 0,0001 %.

Средние относительные погрешности (в процентах) определения толщины пленки Δd_0 приведены на рис. 3, а, показателя преломления пленки Δn_1 — на рис. 3, б, скорости роста пленки Δd_1 — на рис. 3, в и показателя поглощения пленки Δk_1 — на рис. 3, г для случая, когда погрешность измерения коэффициентов отражения принималась равной 1%; закон распределения погрешностей — нормальный. Для каждой точки на графике проводилась серия из 10 измерений, для каждого из которых проводился поиск минимума функции невязки $E(d_0, d_1, n_1, k_1)$ для нахождения значений параметров d_0, d_1, n_1, k_1 (и определения ошибок нахождения каждого их четырех параметров: $\Delta a = \frac{|a_n - a_3|}{a_3}$, где a_n, a_3 — найденное и заданное значения параметра). Для окончательного определения значений параметров d_0, d_1, n_1, k_1 и построения графиков из 10 измерений использовалось только одно измерение, имеющее минимальное значение функции невязки $E(d_0, d_1, n_1, k_1)$.

На рис. 3 видно, что при погрешности измерения коэффициентов отражения, равной 1%, описанный метод позволяет определять толщину, скорость роста и показатель преломления пленки с погрешностью порядка 1 % и менее в широком диапазоне значений параметров. Погрешности определения показателя поглощения пленки гораздо больше (десятки процентов), что связано с небольшим задаваемым значением показателя поглощения пленки (рисунки приведены для слабопоглощающей пленки $k_1 \cong 0,1$) и небольшой толщиной пленки (для приведенных рисунков d_0 изменяется от 0,02 до 0,3 мкм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Толмачев В. А. Определение толщины толстых прозрачных пленок с помощью метода многоугловой эллипсометрии // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 1. – С. 73.
2. Boudreau M. G., Wallace S. G., Balcaitis G., Murugkar S., Haugen H. K., Mascher P. Application of in situ ellipsometry in the fabrication of thin-film optical coatings on semiconductors // Applied Optics. – 2000. Vol. 39. No. 6. – P. 1053.
3. Ralfa-Yuan H., Rancourt J. D., Cumbao M. J. Ellipsometric study of thermally evaporated germanium thin film // Applied Optics. – 1997. – Vol. 36. No. 25. – P. 6360.
4. Qianxi L., Xiaojiang Y., Geyang L., Mingyuan G. Thickness measurement of nanometer films by XRD on nano-multilayers // J. of Materials Science Letters. – 2003. – Vol. 22. – P. 261.
5. Verly P. G. Fourier transform approach for thickness estimation of reflecting interference filters // Applied Optics. – 2006. – Vol. 45. No. 22. – 5636 p.

6. Koysal O., San S. E., Ozder S. Simultaneous determination of refractive index and thickness of multilayer dielectric films by discrete Fourier transform // Optics Communications. – 2004. – Vol. 230. – P. 273.
7. Dobrowolski J. A., Ho F. C., Waldorf A. Determination of optical constants of thin film coating materials based on inverse synthesis // Applied Optics. – 1983. – Vol. 22. No. 20. – P. 3191.
8. Tikhonravov A. V., Trubetskov M. K., Kokarev M. A., Amotchkina T. V., Duparre A., Quesnel E., Ristau D., Guenster S. Effect of systematic errors in spectral photometric data on the accuracy of determination of optical parameters of dielectric thin films // Applied Optics. – 2001. – Vol. 41. No. 13. – P. 2555.
9. Boebel F. G., Hertel B., Moeller H., Preiss W. Real time, in situ measurement of film thickness with reflexion supported pyrometric interferometry (RSPi) // IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. 1994. – P. 311.
10. Farrell T., Armstrong J. V., Kightley P. Dynamic optical reflectivity to monitor the real-time metalorganic molecular beam epitaxial growth of AlGaAs layers // Appl. Phys. Lett. – 1991. – Vol. 59. No. 10. – P. 1203.
11. Гуревич И. Я., Шифрин К. С. Отражение видимого и ИК-излучения света нефтяными пленками на море: Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Новосибирск: Наука, 1979. – 166 с.
12. Воскобойников Ю. Э., Преображенский Н. Г., Седельников А. Н. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука, 1984. – 238 с.
13. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
14. Schoeneburg E., Heinmann F., Feddersen S. Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: Eine Einfuehrung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Bonn; Paris; Reading; Mass. [u.a.]: Addison-Wesley, 1994. – 321 p.
15. Батищев Д. И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач. – Воронеж: Изд-во НГТУ, 1995. – 69 с.

Статья поступила в редакцию 3.11.2010

Михаил Леонидович Белов родился в 1950 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт. Д-р. техн. наук, главн. науч. сотрудник НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной локации и атмосферной оптики.

M.L. Belov (b. 1950) graduated from the Moscow Energy Institute in 1973. D. Sc. (Eng.), chief researcher of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser location and optics of atmosphere.

Алексей Михайлович Белов родился в 1974 г., окончил в 1997 г. Московский энергетический институт. Инженер НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана.

A.M. Belov (b. 1974) graduated from the Moscow Energy Institute in 1997. Engineer of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University.

Виктор Александрович Городничев родился в 1952 г., окончил в 1976 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Д-р. техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Имеет более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.A. Gorodnichev (b. 1952) graduated from the Lomonosov Moscow State University in 1976. D. Sc. (Eng.), head of department of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Валентин Иванович Козинцев родился в 1945 г., окончил в 1969 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р. техн. наук, зам. директора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области лазерной техники.

V.I. Kozintsev (b. 1945) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. D. Sc. (Eng.), deputy director of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of laser technology.

Юрий Викторович Федотов родился в 1974 г., окончил в 1998 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, начальник сектора НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 50 научных работ в области лазерной техники.

Yu.V. Fedotov (b. 1974) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1998. Ph. D. (Eng.), head of sector of “Radio-Electronics and Laser Technology” Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 50 publications in the field of laser technology.