

С.Ю. Боголюбова¹, Е.Г. Полякова², Р.Р. Резвый³¹ АО «НПП “Пульсар”», ² ФГУП «МНИИРИП», ³ ООО НПП «Автоматика-С»

ЭЛЛИПСОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Рассмотрены возможности эллипсометрического метода для оптимизации определения показателя преломления оксинитридных диэлектрических пленок, проанализированы возможности эллипсометрии для определения толщины и оптических констант металлических пленок и полупроводникового соединения $FeSi_2$.

Ключевые слова: методы и программы эллипсометрии, показатель преломления, оптические константы, оксинитридные пленки, металлические пленки, $FeSi_2$ пленки.

Введение

Прогресс твердотельной радиоэлектроники, являющейся одной из приоритетных областей науки и техники, в значительной степени определяется уровнем развития физики и технологии тонкослойных систем на основе полупроводниковых и диэлектрических материалов.

В связи с распространением радиоэлектронных приборов на базе тонкопленочных структур субмикронного диапазона толщин и развитием планарно-эпитаксиальной технологии их изготовления актуальной является проблема изучения свойств таких систем, разработки и обеспечения объективных методов контроля технологических процессов, позволяющих создавать полупроводниковые структуры с заранее заданными свойствами. Поскольку набор материалов и структур, применяющихся в полупроводниковой технологии, постоянно расширяется, требуются усовершенствования локальных, бесконтактных, неразрушающих методов и аппаратуры контроля, исключающих загрязнение и повреждение даже очень малых областей приборных структур.

Одним из таких методов, позволяющих решать указанные проблемы, является эллипсометрия, основанная на анализе изменения состояния поляризации света после его взаимодействия с исследуемым образцом. Метод эллипсометрии характеризуется высокой чувствительностью и точностью измерения тех областей структур, где происходят почти все электронные процессы в приборах [1–3].

Наиболее широко этот метод применяется для измерения толщины и показателя преломления тонких (0,1–10 мкм) и сверхтонких (от долей до нескольких десятков нанометров) пленок, а также для определения оптических констант поверхности различных материалов (показателей преломления и коэффициентов экстинкции), являющихся

мерой структурного совершенства и плотности слоев. Кроме того, объектом эллипсометрических измерений может быть любая характеристика вещества, окружающей среды или технологического процесса, прямо или косвенно влияющая на оптические свойства материала и геометрию исследуемой системы. Эллипсометрический метод может применяться в широком диапазоне температур, в условиях вакуума, при высоких давлениях, в агрессивных внешних средах при газофазном нанесении покрытий, в жидкостях (при травлении поверхности полупроводников, анодном окислении, измерениях в иммерсионных средах). Достоинство метода заключается также в принципиальной возможности автоматизации процесса измерения и возможности совместного использования с другими методами исследования: оже-спектроскопией, дифракцией медленных электронов, электронной микроскопией, масс-спектроскопией вторичных ионов, электронной спектроскопией для химического анализа и др. [4]. Некоторые из этих методов эффективно используются, например, для исследования β -дисилицида железа в кремнии, формируемого методом ионного синтеза [5]. Эллипсометрический метод позволяет исследовать свойства таких относительно новых материалов, как соединения $FeSi_2$ или аналогичных, используемых в полупроводниковой радиоэлектронике [6].

Аппаратура и программы для эллипсометрических измерений

Экспериментальные исследования материалов и структур твердотельной радиоэлектроники проводились при помощи лазерного эллипсометра L116S300 фирмы Gaertner Scientific Corporation. Этот прибор укомплектован газовым лазером на длину волны 0,6328 мкм. В состав аппаратуры включен

поляризационный объектив для микроэллипсометрических измерений на площади 15×52 мкм (при угле падения 70°). Диапазон измеряемых толщин диэлектрических пленок – от 0 до 60000 Å. Точность измерения показателя преломления – $\pm 0,001$. Время одного измерения не превышает 1 с. К эллипсометру прилагаются стандартные образцы для калибровки и поверки аппаратуры ([4], с. 158–159).

В настоящее время разными организациями разработаны эллипсометрические программы, позволяющие решать так называемые прямые и обратные задачи. При решении прямых задач задают параметры структур: толщины, показателя преломления и коэффициенты экстинкции, на основе которых определяют эллипсометрические параметры ψ и Δ . Такие задачи можно решать аналитически. Обратные задачи позволяют находить толщины, показатели преломления и коэффициенты экстинкции на основе эллипсометрических углов ψ и Δ . Эти задачи решают при помощи специально разработанных программ для компьютеров [7–10].

Контроль материалов и слоев, применяющихся в полупроводниковой электронике

Контроль параметров диэлектрических покрытий. Нитридные пленки (Si_3N_4) являются полезными покрытиями в кремниевой планарной технологии, так как они, в отличие от оксидных пленок (SiO_2), не травятся в плавиковой кислоте. Однако при пиролитическом методе осаждения нитридных пленок часто получают оксинитридные пленки, менее устойчивые к воздействию плавиковой кислоты. Различить эти материалы позволяет эллипсометрия: показатель преломления нитридных пленок $n_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 2,2$, показатель преломления оксидных пленок $n_{\text{SiO}_2} = 1,45$, а показатель преломления оксинитридных пленок обычно меняется в пределах 1,7–1,9. Здесь, однако, необходимо выбирать оптимальную толщину пленки, при анализе которой эллипсометрическим методом показатель преломления пленки определяется с наибольшей точностью. В табл. приведена рассчитанная нами при использовании эллипсометрической программы связь между параметрами величин $d\psi/dn$ и $d\Delta/dn$, (здесь dn – разность между коэффициентами преломления исследуемых пленок) и толщиной пленки d , нанесенной на подложку из кремния. Значения

эллипсометрических углов ψ и Δ рассчитаны для показателей преломления пленок $n_1 = 2,2$ и $n_2 = 1,9$.

Из табл. 1 видно, что в наибольшей степени эллипсометрические углы ψ и Δ меняются в диапазоне толщин пленок около 900–1050 Å.

Контроль параметров тонких металлических пленок. Эллипсометрический метод позволяет определять толщину тонких пленок (обычно – в пределах 100–500 Å). Пленки титана, молибдена, алюминия и других материалов указанной толщины обычно используются при формировании омических контактов GaN СВЧ-транзисторов [4]. При операции формирования металлических пленок используются «спутники», состоящие из кварцевой, стеклянной или сапфировой пластины с одной полированной, а другой шлифованной поверхностями. Сначала на полированную сторону пластины наносится непрозрачная металлическая пленка (обычная толщина для указанных выше металлов – 1–2 мкм). Для этой пленки при использовании разработанной эллипсометрической программы находятся оптические параметры: показатель преломления и коэффициент экстинкции. Далее при использовании другой эллипсометрической программы строится Δ - ψ -кривая для тонких пленок в диапазоне указанных выше толщин. В качестве примера Δ - ψ -кривые приведены на рис. 1 для пленок титана ($n_{\text{Ti}} = 2,153$, $k_{\text{Ti}} = 2,924$, [4, с. 161]), нанесенных на сапфировую подложку. В реальных условиях оптические константы пленок могут изменяться. Как указано в [4, стр.165], показатели преломления титановых пленок, полученных при различных процессах напыления, могут изменяться в пределах до 7%, а коэффициенты экстинкции – до 5%. На рис. 1 приведены Δ - ψ -кривые, построенные для толщин пленок в диапазоне 100–500 Å для показателя преломления $2,153 \pm 7\%$ и коэффициентов экстинкции $2,924 \pm 5\%$.

Сопоставляя измеренные эллипсометрические параметры тонких пленок с Δ - ψ -кривыми, можно определить их толщину.

Контроль параметров пленок FeSi_2 . Толщину указанных пленок можно определить методом, который изложен выше для металлических пленок. Пленки FeSi_2 можно получить, напыляя железо и кремний в определенном сочетании на кварцевую подложку или нанося эти элементы методом

Таблица. Параметры $d\psi/dn$ и $d\Delta/dn$ в зависимости от толщины пленки d

d , Å	150	300	450	600	750	900	1050	1200	1350	1500
$d\psi/dn$	1,69	4,45	6,49	7,69	17,61	58,38	71,53	54,03	14,12	34,19
$d\Delta/dn$	1,55	15,48	35,29	65,83	120,65	1052	94,28	94,02	139,5	218,1

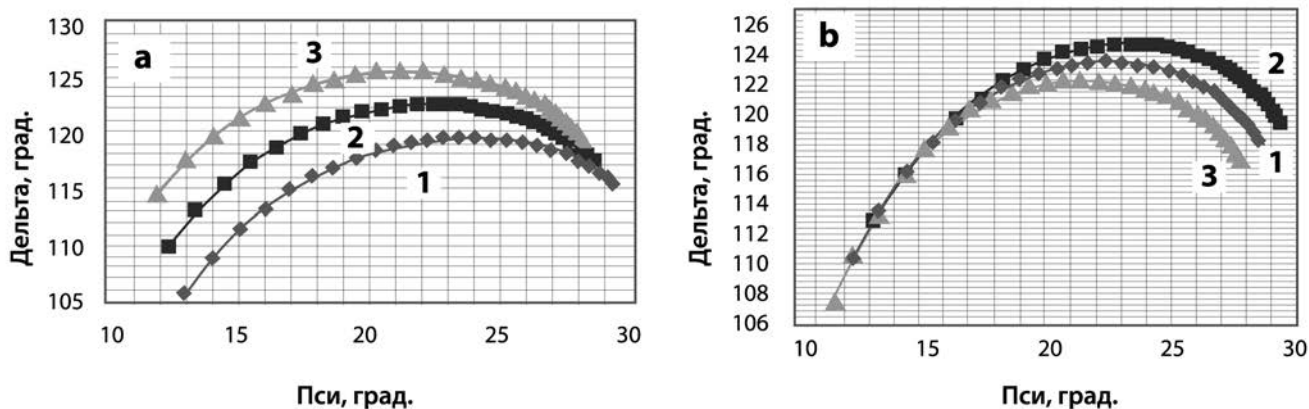


Рисунок 1. Эллипсометрические Δ - ψ -зависимости для определения толщины тонких пленок титана: а – при $k = 2,92$: 1 – $n = 2,00$; 2 – $n = 2,15$ и 3 – $n = 2,30$; б – при $n = 2,15$: 1 – $k = 2,92$; 2 – $k = 3,07$ и 3 – $k = 2,78$. Диапазон толщин меняется от 100 \AA (левая сторона кривых) до 500 \AA с шагом 10 \AA

молекулярной эпитаксии. При длине волны $0,6328 \text{ мкм}$ $n_{\text{FeSi}_2} = 3,79$ и $k_{\text{FeSi}_2} = 2,10$ [11]. Вместе с тем при неизменном показателе преломления для коэффициента экстинкции приводятся и другие значения ($k = 1,8$ и $k = 3,0$). Нами для этих значений построены Δ - ψ -кривые для диапазона толщины тонких пленок от 100 \AA до 500 \AA (рис. 2).

При использовании этого рисунка можно измерять толщины тонких пленок FeSi_2 , сопоставляя измеренные эллипсометрические параметры тонких пленок FeSi_2 , нанесенных на кварцевую подложку, с данными, приведенными на Δ - ψ -кривых.

Заключение

Приведенные примеры иллюстрируют широкие возможности эллипсометрических методов для контроля параметров диэлектрических, металлических и полупроводниковых пленок, перспективных для использования в твердотельной радиоэлектронике.

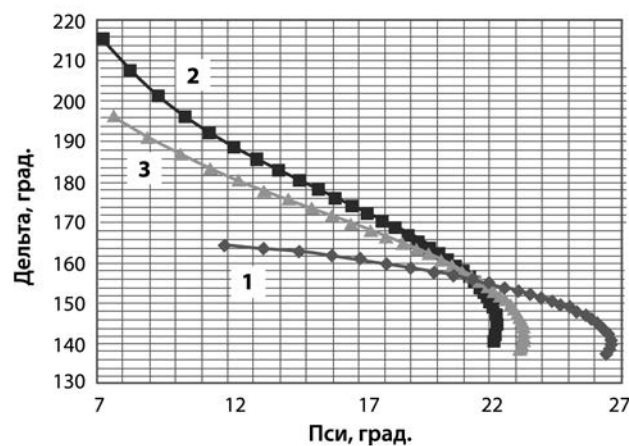


Рисунок 2. Эллипсометрические Δ - ψ -зависимости для определения толщины тонких пленок FeSi_2 : при $n = 3,79$: 1 – $k = 3,0$; 2 – $k = 1,8$ и 3 – $k = 2,10$. Диапазон толщин меняется от 100 \AA (левая сторона кривых) до 500 \AA с шагом 10 \AA

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ржанов А. В., Свиташев К. К. Основы эллипсометрии. Новосибирск: Наука, 1979. 423 с.
2. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1982. 582 с.
3. Резвый Р. Р. Эллипсометрия в микроэлектронике. М.: Радио и связь, 1983, 120 с.
4. Груздов В. В., Колковкий Ю. В., Концевой Ю. А. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике. М.: Техносфера, 2016. 328 с.
5. Бешенков В. Г., Пархоменко Ю. Н., Подгорный Д. А., Полякова Е. Г. Диагностика фазового состава скрытых слоев силицидов железа в кремнии по оже-спектрам при ионном профилировании // Материалы XX Российской конференции по электронной микроскопии. 2005. Т. 69. № 4. С. 493–497
6. Тарасов И. А., Косырев Н. Н., Варнаков С. Н. и др. Эллипсометрическая экспресс-методика определения толщины и профилей оптических постоянных в процессе роста наноструктур $\text{Fe}/\text{SiO}_2/\text{Si}(100)$ // Журнал технической физики. 2012. Т. 82. С. 44.
7. Бурькин И. Г. и др. Алгоритмы и программы для численного решения некоторых задач эллипсометрии. М.: Наука, 1980. 192 с.
8. Завадский Ю. И., Концевой Ю. А. Программа POL-KNS, BAS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010613998 от 21.06.2010.
9. Гуськов Б. Л., Завадский Ю. И., Концевой Ю. А. Программа REF-3D, BAS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617200 от 21.06.2010.
10. Гуськов Б. Л., Завадский Ю. И., Концевой Ю. А. Программа OPT-MIN, BAS. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617200 от 28.07.2011.

11. Тарасов И. А., Попов З. И., Варнаков С. Н. и др. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2014. Т. 99. С. 610.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Боголюбова Светлана Юрьевна, инженер 1-й категории, АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной пр-д, д. 27, тел. 8 (495) 366-54-00, e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru.

Полякова Елена Георгиевна, инженер-испытатель 1-й категории, ФГУП «МНИИРИП», Мытищи, ул. Колпакова, д. 2А, тел.: 8 (977) 440-72-55, e-mail: polakkk 2000@mail.ru.

Резвый Ростислав Ростиславович, д.т.н., зам. начальника отдела по научной работе, ООО НПП «Автоматика-С», 123298, Москва, ул. 3-я Хоросhevская, д. 13, корп. 1, тел. 8 (495) 956-49-95, e-mail: info@avts.ru.

For citation: *Radiopromyshlennost. – 2016. – № 3. – P. 59–62.*
S. Bogolyubova, E. Polyakova, R. Rezvyi

ELLIPSOMETRIC METHODS FOR CONTROL OF PARAMETERS OF MATERIALS AND RADIOELECTRONICS STRUCTURES

The possibilities of ellipsometric method for optimization of identification of refractive index of oxynitride dielectric films have been reviewed, the possibility of ellipsometry for identification of the thickness and optical constants of metal films and semiconductor compound FeSi_2 .

Keywords: ellipsometry methods and programs, refractive index, optical constants oxynitride film, metal film, FeSi_2 film.

REFERENCES

1. Rzhанov A. V., Svitashев K. K. *Osnovy ellipsometrii* [Bases of ellipsometry]. Novosibirsk: Nauka, 1979. 423 p.
2. Azzam R., Bashara N. *Ellipsometriya i polarizovannyi svet* [Ellipsometry and polarized light]. M.: Mir, 1982. 582 p.
3. Rezvyi R. R. *Ellipsometriya v mikroelektronike* [Ellipsometry in microelectronics]. M.: Radio i svyaz', 1983, 120 p.
4. Gruzдов V. V., Kolkovkiy Yu. V., Kontsevoy Yu. A. *Kontrol' novykh tekhnologiy v tverdotel'noy SVCh elektronike* [Control of new technologies in solid-state microwave electronics]. M.: Tekhnosfera, 2016. 328 p.
5. Beshenkov V. G., Parkhomenko Yu. N., Podgornyy D. A., Polyakova E. G. Diagnostika fazovogo sostava skrytykh sloev silitsidov zheleza v kremnii po ozhe-spektram pri ionnom profilirovanii [Diagnostics of phase structure of the latent layers of silicides of iron in silicon on oxe-spectrum at ionic profiling]. *Materialy XX Rossiyskoy konferentsii po elektronnoy mikroskopii*, 2005, Vol. 69, no. 4, pp. 493–497.
6. Tarasov I. A., Kosyrev N. N., Varnakov S. N. i dr. Ellipsometrichesкая ekspress-metodika opredeleniya tolshchiny i profiley opticheskikh postoyannykh v protsesse rosta nanostruktur $\text{Fe/SiO}_2/\text{Si}(100)$ [Ellipsometric express method of determining the thickness and optical constants profiles during growth of nanostructures $\text{Fe/SiO}_2/\text{Si}(100)$]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2012, Vol. 82, pp. 44.
7. Burykin I. G. i dr. *Algoritmy i programmy dlya chislennogo resheniya nekotorykh zadach ellipsometrii* [Algorithms and programs for the numerical solution of some problems of ellipsometry]. M.: Nauka, 1980. 192 p.
8. Zavadskiy Yu. I., Kontsevoy Yu. A. Programma POL-KNS, BAS. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2010613998 ot 21.06.2010 [Program POL-KNS, BAS. Certificate of state registration of the computer program № 2010613998 from 21.06.2010].
9. Guskov B. L., Zavadskiy Yu. I., Kontsevoy Yu. A. Programma REF-3D, BAS. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2011617200 ot 21.06.2010 [Program REF-3D, BAS. Certificate of state registration of the computer program № 2011617200 from 21.06.2010].
10. Guskov B. L., Zavadskiy Yu. I., Kontsevoy Yu. A. Programma OPT-MIN, BAS. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2011617200 ot 28.07.2011 [Program OPT-MIN, ABS. Certificate of state registration of the computer program № 2011617200 from 28.07.2011].
11. Tarasov I. A., Popov Z. I., Varnakov S. N. i dr. Issledovanie strukturnykh i magnitnykh kharakteristik epitaksial'nykh plenok $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$ [The study of the structural and magnetic properties of epitaxial membranes $\text{Fe}_3\text{Si}/\text{Si}(111)$] // *Pis'ma v Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki*, 2014, Vol. 99, pp. 610.

AUTHORS

Bogolyubova Svetlana, engineer 1st category, OJSC «NPP «Пульсар», 27, pr. District, Moscow, 105187, tel.: +7 (495) 366-54-00, e-mail: enisherlova@pulsarnpp.ru.

Polyakova Elena, a test engineer 1st category, FSUE «МНИИРИП», 2А, st. Kolpakova, Mytischy, tel.: +7 (977) 440-72-55, e-mail: Polakkk 2000@mail.ru.

Rezvy Rostislav, PhD, Deputy head of Department for Science, ООО NPP «Автоматика-С», 123298, Moscow, ul. 3rd Khoroshevskaya, d. 13, Bldg. 1, tel.: +7 (495) 956-49-95, e-mail: info@avts.ru.