

УДК 539.535.621

Н.Н. НИКИФОРЕНКО, А.А. ЛАБУДА, П.Г. ЮРЕВИЧ, А.А. СИДЕРКО, П.А. КЕДИЧ

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОК БОРОФОСФОРСИЛИКАТНОГО СТЕКЛА

The possibility to realize the spectrometric control over the basic parameters (thickness, uniformity, impurity refraction and concentration) of the silicon oxide films doped by phosphorous and boron is studied. Owing to the use of the specially developed high-speed computerized spectrophotometric system on the basis of the domestic S100 spectrometer, the film parameters may be controlled not only after but also in the process of its formation. It is determined that in the visible wavelength range a refractive index of the films is considerably dependent on the concentration of phosphorous, being insensitive to changes in the boron concentration.

В настоящее время в качестве планаризирующего диэлектрика в технологии многоуровневых интегральных схем для выравнивания рельефа поверхности используется диоксид кремния (SiO_2), легированный в процессе нанесения примесью бора и фосфора, понижающей температуру оплавления создаваемого борофосфоросиликатного стекла (БФСС) до $700\div 800$ °С [1, 2]. Чрезмерно большая концентрация легирующей примеси генерирует в планаризируемом слое различного рода дефекты [3], тогда как при малой ее концентрации не достигаются оптимальные значения температуры оплавления и угла планаризации. Следовательно, необходимый режим планаризации требует жесткого контроля величины легирующей примеси и толщины пленки диэлектрика в процессе ее формирования. В современной технологии микроэлектроники концентрация бора и фосфора в пленках БФСС определяется после нанесения планаризирующего слоя, для чего используются такие сложные в реализации методы, как Оже-спектроскопия с послойным стравливанием, инфракрасная абсорбционная спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ. Целью настоящей работы является определение возможностей спектрофотометрического контроля параметров пленок БФСС с помощью разработанной нами в последние годы высоконадежной, недорогой и малогабаритной спектрофотометрической системы [4].

Методика и результаты исследований

Созданная компьютеризированная система контроля [4] имеет покадровую регистрацию спектра с экспозицией 7,3 мс, что обеспечивает достаточное быстродействие и временное разрешение для слежения за ходом формирования покрытия. Даже при использованной нами в данных исследованиях пакетной регистрации и усреднения 50 кадров (с целью повышении точности) обновленная информация о параметрах пленки выдается компьютером каждые 0,5 с, чего вполне достаточно для слежения

за ходом большинства техпроцессов. В микроэлектронике тонкие прозрачные диэлектрические пленки (например, оксид и нитрид кремния) наносят на кремниевую подложку, что определяет некоторые алгоритмические и методические особенности определения их параметров, которые рассмотрим на примере пленок БФСС.

Объектом исследования являлись экспериментальные образцы пленок БФСС с известной концентрацией бора C_B и фосфора C_P (табл. 1) на кремниевых пластинах диаметром 100 мм. Эти пленки были нанесены в заводских условиях НПО «Интеграл» методом вакуумного пиролиза элементоорганических соединений в реакторах горизонтального типа с горячей стенкой при температуре $660 \div 700$ °С и давлении $30 \div 40$ Па. Содержание фосфора в пленках определено рентгенофлуоресцентным, а бора – ИК-спектроскопическим методами, имеющими относительную точность около 5 %.

Таблица 1

Концентрация бора и фосфора в образцах пленок БФСС

Условный номер образца	Легирующая примесь и ее концентрация, вес. %	
	C_P	C_B
2	6 (6,13)	0
3	5,5	0
4	5 (5,38)	0
29	2,9	4,2
30	2,0	4,13
5	3,8	4,76
36	3,8	3,4
31	3,0	4,6

Примечание. Для образцов с условными номерами 2 и 4 в скобках указаны значения концентрации фосфора, полученные методом ИК абсорбционной спектроскопии.

Спектрофотометрирование проводилось следующим образом: на всех экспериментальных образцах произвольным образом выбирались три точки (A, B, C) в центральной области пластины, для каждой из которых регистрировался спектральный коэффициент отражения в диапазоне от 380 до 840 нм, пример которого представлен на рис. 1.

Рассмотрим методические и алгоритмические особенности определения параметров пленок на примере образца 3 (табл. 2). Алгоритмически расчет параметров тонкой пленки начинается с определения положения экстремумов, т. е. λ_k (см. табл. 2). Этот процесс в данном случае имеет методический нюанс вследствие сильной зависимости коэффициента отражения кремния от длины волны, особенно в коротковолновой области. В теории и практике [5] обычно за λ_k принимают те значения длины волны, которые соответствуют экстремальным значениям коэффициента отражения. Это ошибочное действие вытекает из того, что оптики, как правило, используют подложки со слабой дисперсией (различные стекла). В нашем случае пренебрегать дисперсией подложки не следует, так как это может привести к ошибке в определении λ_k на 1–2 нм. Алгоритм определения координат максимумов спектра отражения рассматриваемых пленок – это нахождение точек касания спектра отражения пленки и спектра отражения кремниевой подложки.

Для определения координат λ_k и R_M минимумов к ним необходимо провести касательную кривую, по форме схожую с кривой отражения кремниевой пластины. Кроме того, обсчету могут быть подвергнуты экстремумы, находящиеся не далее 750 нм из-за искажений характеристики отражения, возникающих вследствие наложения спектра второго порядка дифракции, что отчетливо видно (см. рис. 1).

Зная λ_k , определяем порядковые номера экстремумов k спектра отражения (см. табл. 2) путем решения системы уравнений (1) относительно k для соседних экстремумов, при этом будем вполне обоснованно пренебрегать дисперсией и учитывать [5], что минимумы нечетные, а максимумы четные числа:

$$nh = \frac{\lambda_k k}{4}, \quad nh = \frac{\lambda_{k+1} (k+1)}{4}. \quad (1)$$

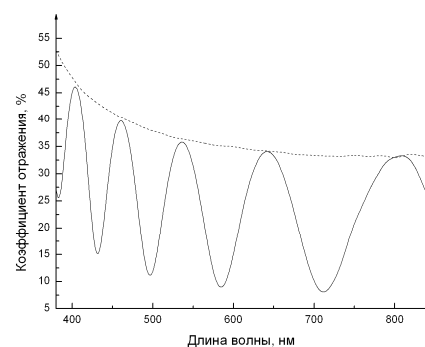


Рис. 1. Спектральный коэффициент отражения образца 3 (пунктиром отображен типичный спектральный коэффициент отражения кремниевой подложки)

Спектрофотометрические параметры пленки БФСС образца 3

Область измерения	Номер экстремума, k	Длина волны экстремума λ_k , нм	Коэффициент отражения кремниевой подложки R_{Si} , %	Экстремальный коэффициент отражения R_M , %	Показатель преломления кремния n	Показатель преломления пленки $n_{пл}$	Толщина пленки h , нм	Усредненное значение толщины пленки $h_{ср}$, нм	Уточненный показатель преломления пленки n_y
A	16	405,3	—	—	—	—	—	1113,1	1,4565
	15	430,2	0,426	0,152	4,7585	1,4453	1116,20		1,4493
	14	461,1	—	—	—	—	—		1,4499
	13	495,6	0,372	0,111	4,1271	1,4368	1121,05		1,4470
	12	536,1	—	—	—	—	—		1,4449
	11	583,8	0,352	0,090	3,9176	1,4524	1105,38		1,4423
	10	641,5	—	—	—	—	—		1,4408
	9	713,9	0,335	0,080	3,7483	1,4476	1109,65		1,4431
B	16	403,9	—	—	—	—	—	1108,9	1,4514
	15	429,7	0,430	0,152	4,8096	1,4530	1108,96		1,4476
	14	460,4	—	—	—	—	—		1,4477
	13	494,3	0,375	0,112	4,1596	1,4400	1115,61		1,4432
	12	535,5	—	—	—	—	—		1,4433
	11	583,5	0,348	0,090	3,8770	1,4449	1110,57		1,4416
	10	641,5	—	—	—	—	—		1,4408
9	712,6	0,340	0,080	3,7973	1,4570	1100,46	1,4404		
C	16	403,1	—	—	—	—	—	1109,1	1,4486
	15	429,2	0,428	0,152	4,7840	1,4492	1110,64		1,4460
	14	458,8	—	—	—	—	—		1,4426
	13	493	0,377	0,112	4,1814	1,4438	1109,78		1,4394
	12	534,7	—	—	—	—	—		1,4411
	11	581,9	0,351	0,090	3,9074	1,4505	1103,21		1,4376
	10	639,1	—	—	—	—	—		1,4354
	9	711,3	0,330	0,080	3,6999	1,4382	1112,81		1,4378

Из системы (1) следует

$$k \approx \frac{\lambda_{k+1}}{\lambda_k - \lambda_{k+1}}$$

Далее по известным [4, 5] формулам

$$n = \frac{\sqrt{R} + 1}{1 - \sqrt{R}},$$

$$n_{пл} = \sqrt{n \frac{1 - \sqrt{R_M}}{1 + \sqrt{R_M}}}$$

рассчитываем показатели преломления кремния n и пленки $n_{пл}$, что позволяет вычислить толщину пленки h по (1) столько раз, сколько минимумов спектра отражения зарегистрировано. Путем усреднения результатов можно более точно определить значение толщины пленки $h_{ср}$ в области фотометрирования и уточнить значения показателя преломления пленки n_y для всех λ_k , воспользовавшись вновь формулами (1). В рассматриваемом случае дисперсию удалось выявить по 8 точкам в каждой области фотометрирования.

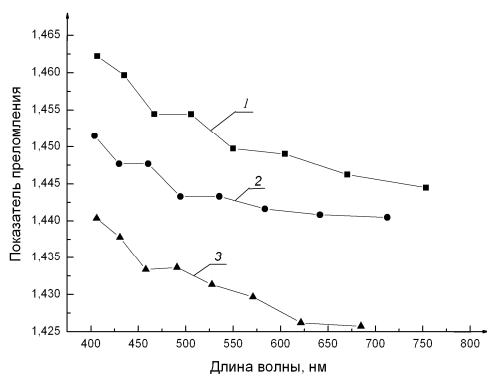


Рис. 2. Зависимости показателя преломления от длины волны для образцов пленок ФСС при различном уровне концентрации фосфора:

1 – 6 % (образец 2), 2 – 5,5 % (образец 3), 3 – 5 % (образец 4)

На рис. 2 представлены зависимости показателя преломления от длины волны (дисперсии) для образцов пленки фосфоросиликатного стекла (ФСС) с различными концентрациями фосфора. Зарегистрированные различия показателя преломления для какой-либо длины волны этих образцов существенно превышает разброс значений (около 0,005) для различных областей фотометрирования (см. табл. 2). Таким

образом, налицо явная зависимость дисперсии от концентрации фосфора. Сопоставление данных (по показателю преломления) для образцов с различными концентрациями бора, но одинаковым уровнем примеси фосфора не позволило выявить определенной зависимости, что свидетельствует о весьма слабой зависимости показателя преломления от концентрации бора. Вместе с тем для образцов пленок БФСС, отличающихся содержанием примеси фосфора (рис. 3), прямо пропорциональная зависимость показателя преломления от концентрации фосфора проявляется достаточно отчетливо, что позволяет сделать вывод о применимости такого способа контроля примеси фосфора наряду с другими основными параметрами пленки (толщиной, равномерностью). Исходя из полученных результатов можно сделать предварительное заключение о примерном равенстве концентрационной чувствительности по фосфору рассматриваемого метода контроля и традиционных (рентгено-флуоресцентного и ИК-спектроскопического).

* * *

Предлагаемый спектрофотометрический способ контроля примеси выгодно отличается от применяемых обычно как по затратности, так и по быстройдействию, поскольку позволяет контролировать основные параметры пленки даже в ходе ее формирования. Принимая во внимание то обстоятельство, что в технологии нанесения пленок БФСС примесь бора можно достаточно жестко «привязать» к примеси фосфора путем фиксации расхода соответствующих газов или приготовления заранее рабочей газовой смеси с требуемым соотношением концентрации этих газов, можно сделать вывод о применимости рассматриваемого способа оперативного контроля не только для пленок ФСС, но и для пленок БФСС. Таким образом, результаты проведенных исследований обосновывают возможность реализации на современной технической базе спектрофотометрического оперативного контроля основных параметров примесносилкатных слоев в процессе их формирования.

1. Духнова Г.С., Васильев В.Ю., Веретинин Ю.И. // Обзоры по электронной технике ЦНИИ «Электроника». Сер. 3. М., 1988. Вып. 4. С. 1.
2. Лабуда А.А., Сидерко А.А. // Радиофизика и электроника: Сб. науч. тр. Мн., 1996. С. 107.
3. Лабуда А.А., Сидерко А.А. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 1995. № 1. С. 30.
4. Бурмаков А.П., Кулешов В.Н. и др. // Электроника инфо. 2006. № 8. С. 42.
5. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Оптические свойства и методы исследования. Л., 1973.

Поступила в редакцию 20.03.08.

Николай Николаевич Никифоренко – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники.
Антон Антонович Лабуда – доктор физико-математических наук, профессор кафедры физической электроники.
Павел Генрихович Юревич – аспирант кафедры физической электроники. Научный руководитель – А.А. Лабуда.
Александр Александрович Сидерко – заместитель технического директора завода «Транзистор» ПО «Интеграл».
Павел Андреевич Кедич – студент 4-го курса факультета радиофизики и электроники.

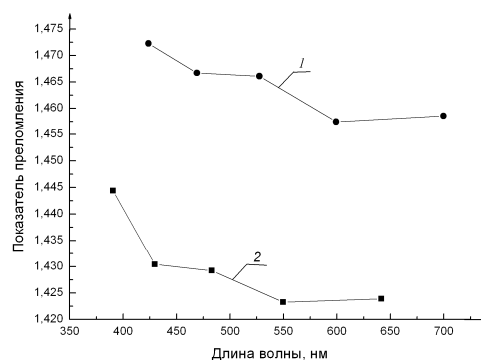


Рис. 3. Зависимости показателя преломления от длины волны для образцов пленок БФСС при различном уровне концентрации фосфора: 1 – $C_P = 2,9\%$, $C_B = 4,2\%$ (образец 29), 2 – $C_P = 2,0\%$, $C_B = 4,13\%$ (образец 30)