

СТРУКТУРА И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА SOG-ПЛЕНОК, ОБЛУЧЕННЫХ УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ

А.В. Леонтьев¹, Н.А. Крекотень², Ю.С. Леонтьева³

¹Белгосуниверситет, Минск, Беларусь

²НТЦ Белмикросистемы, Минск, Беларусь

³УП Минский НИИ радиоматериалов, Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования влияния облучения высокоэнергетичными протонами и ионами азота на оптические свойства кремнийорганических пленок. Показано, что ионное облучение приводит к увеличению коэффициента преломления SOG-пленок. Это делает возможным их использование в качестве покровных и волноводных слоев диэлектрических микроволноводов. Результаты по кинетике радиационного травления SOG-пленок представляется весьма перспективной для замены в технологиях изготовления МЭМС синхротронного излучения на протонное.

Введение

Известно, что кремний-органические соединения являются весьма перспективными материалами для применения в качестве волноводных и покровных слоев диэлектрических микроволноводов [1], чувствительных элементов газовых сенсоров [2] и ряда других практически важных приложений. Среди широкого разнообразия кремний-органических соединений особое место занимают материалы класса «Spin-on-Glass» (SOG) широко используемые в современной микроэлектронике для планаризации поверхности, изоляции и ряда других технологических применений. Коэффициент преломления указанных материалов находится в пределах 1,38 – 1,42, что делает возможным их применение в кремниевой технологии только в качестве покровных слоев диэлектрических микроволноводов. Расширение функциональных возможностей SOG-материалов в кремниевой технологии возможно при увеличении их коэффициента преломления, путем введения специальных добавок, а также посредством высокоэнергетического ионного облучения. На основе таких модифицированных пленок возможно изготовление оптических переключающих устройств пикосекундного диапазона, направленных соединителей, интерферометров Маха – Цендера, планарных и трехмерных диэлектрических микроволноводов и ряда других практически важных устройств [1, 2] для интегральной оптики и оптоэлектроники. Отметим также, что пленки SOG используются в микромеханике – МЭМС и МОЭМС (*Silex SX*-серия). 3D-структуры создаются с применением воздействия синхротронного излучения (СИ) и SOG-пленок.

Цель настоящей работы – исследование оптических свойств и структуры пленок SOG, подвергнутых ионной бомбардировке.

Результаты и их обсуждение

Для эксперимента использовали пленки фирмы «FILMTRONICS» (SOG SF) серии метилсилосанов, содержащих 10 - 15 вес% CH₃ групп, связанных с атомами кремния. Пленки толщиной 0,34 - 0,35 мкм проходили термическую обработку при 425 °С в атмосфере азота. Методики определения толщины и оптических констант полученных пленок описаны в [3].

Облучение протонами и ионами азота проводили на исследовательско-имплантационном

комплексе на базе электростатического ускорителя ионов ЭСУ-2 в лаборатории элионики НИИ ПФП. Параметры облучения приведены ниже в табл. 1. Плотность мишени полагали равной 1,75 г/см³.

Таблица 1.
Проецированный пробег, страгглинг, потери энергии и коэффициент физического распыления SOG-пленок протонами и ионами азота

Ион/Энергия (кэВ)	R _p , нм	ΔR _p , нм	[dE/dx] _e , эВ/нм	Y _f
H ⁺ (200)	2310	167	78,9	0,0005
H ⁺ (300)	3700	215	65,2	0,0004
H ⁺ (370)	4830	251	58,4	0,0003
N ⁺ (200)	665	141	281 : 220	0,30
N ⁺ (300)	932	167	360 : 280	0,22

Результаты моделирования показывают, что при заданной толщине пленки SOG величина [dE/dx]_e для протонов практически постоянна по глубине мишени. При облучении ионами азота величины неупругих потерь энергии на входе и выходе из мишени различаются (табл. 1).

Данные ИК-спектроскопии исходных и облученных ионами азота пленок SOG приведены на рис. 1. Видно, что структура исходных пленок близка к полигидроксиметилсилосану (ПГМС). Прецизионное определение толщины и коэффициента преломления проводилось методом лазерной эллипсометрии с использованием четырехзонной методики измерений и пяти углов падения лазерного излучения. Результаты расчетов по программе ELLIPS показали, что коэффициент преломления исходных пленок находится в пределах 1,41 – 1,42, а коэффициент поглощения можно считать равным нулю. Спектры резерфордского обратного рассеяния ионов гелия имплантированных образцов SOG показали, что для всех пленок отношение концентраций N_O/N_{Si} ≈ 2. В таблицах 2, 3 приведены измеренные значения оптических констант и относительного изменения толщины пленок Δd(D)/d₀.

Обсуждение полученных результатов начнем с анализа кинетики радиационной усадки пленки. Из данных табл. 2, 3 видно, что ионная бомбардировка пленок SOG сопровождается интенсивной радиационной усадкой. В то же время при облучении протонами коэффициент физического распыления пленок Y_f (см. табл. 1) практически равен нулю и не может объяснить наблюдаемых значений радиационной усадки. При облучении

пленок SOG ионами азота (см. табл.3) усадка превышает 30%. Аналогичный эффект, но при облучении кремнийорганических соединений синхротронным излучением описан в [4]. Показано, что при достижении критических доз пленка полимера может полностью исчезнуть. Подобный процесс, только с другим механизмом структурных преобразований, вероятно, протекает и в рассматриваемых нами системах.

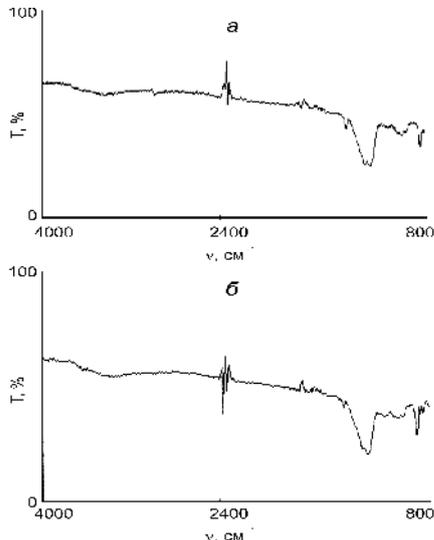


Рис. 1. Спектры пропускания пленок SOG на кремниевой подложке КДБ 12: а - до облучения; б - после облучения ионами азота с $E = 200$ кэВ и $D = 10^{15}$ ион/см²

Как видно из табл. 2, 3, ионное облучение приводит к существенному увеличению коэффициента преломления кремнийорганических пленок. При облучении протонами до доз 1×10^{15} см⁻² коэффициент экстинкции близок к нулю, а величина n достигает 1,545, что существенно превышает коэффициент преломления SiO₂ (1,46). Облучение азотом не дает каких-либо преимуществ перед протонным облучением. Избыток выделенной по сравнению с протонным облучением энергии приводит только к повышению коэффициента экстинкции (табл.2,3). Величина n существенно не превышает значения, полученные при протон-

ном облучении. В работе [6] при изучении оптических свойств облученных пленок полигидроксиметилсилоксана (PHMS) определить одновременно толщину и коэффициент преломления не удалось, но приведены значения произведения (nd) . Величина (nd) по данным [6] убывает с ростом дозы облучения. Данные табл. 2 показывают, что поведение (nd) может быть более сложным. В диапазоне доз ($D = 10^{13} - 10^{14}$ см⁻²) величина (nd) практически не меняется. В [6] также отмечалось, что при высокоэнергетичном облучении ионами Au⁺ с энергией 3 МэВ PHMS- пленок в матрице образуются кластеры углерода. Исследование полученных нами пленок методами просвечивающей электронной микроскопии в геометрии "plan-view" (рис.1) показало их дисперсную структуру (рис.1). Некоторые наноразмерные выделения имеют ограниченную границу, что может свидетельствовать об их кристаллической структуре.

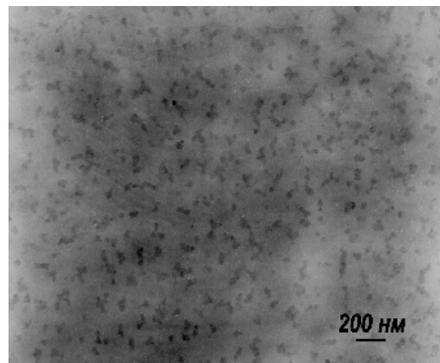


Рис.1. Структура пленки SOG облученной ионами азота: 300 кэВ, $D=5 \times 10^{15}$ см⁻².

Образование гетерогенной структуры при облучении SOG –пленок протонами и ионами азота является одной из вероятных причин увеличения их коэффициента преломления. Состав обнаруженных образований до конца не выяснен, но возможно, что при ионном облучении пленка кремнийорганического соединения распадается с образованием матрицы SiO_x, а атомы углерода образуют по аналогии с данными [5] кластеры.

Таблица 2.

Таблица 2. Коэффициент преломления (n), экстинкции (k) and $\Delta d / d_0$ (%) для SOG пленок облученных H⁺.

H ⁺ (200 keV) ⇒ SOG				H ⁺ (300 keV) ⇒ SOG				H ⁺ (370 keV) ⇒ SOG				
D, см ⁻²	n	k	$\Delta d/d_0$	D, см ⁻²	n	k	$\Delta d/d_0$	(nd), μm	D, см ⁻²	n	k	$\Delta d/d_0$
1×10^{14}	1.470	0	7.8	1×10^{13}	1.425	0	1.8	0.48	1×10^{14}	1.455	0	5.1
5×10^{14}	1.505	0	8.5	5×10^{13}	1.430	0	3.1	0.48	5×10^{14}	1.475	0	13.3
1×10^{15}	1.535	0.001	9.1	1×10^{14}	1.450	0	4.9	0.47	1×10^{15}	1.525	0.001	18.7
5×10^{15}	1.580	0.016	9.4	5×10^{14}	1.450	0	11.1	0.44	5×10^{15}	1.525	0.01	19.6
1×10^{16}	1.545	0.04	17.3	7×10^{14}	1.470	0	11.8	0.44	1×10^{16}	1.515	0.016	20.6
-	-	-	-	1.2×10^{15}	1.480	0	13.7	-	-	-	-	-
-	-	-	-	5×10^{15}	1.545	0.015	22.8	-	-	-	-	-
-	-	-	-	1×10^{16}	1.517	0.001	23.5	-	-	-	-	-
-	-	-	-	3×10^{16}	1.525	0.011	24.9	-	-	-	-	-

Таблица 3.

Коэффициент преломления (n), экстинкции (k) and $\Delta d/d_0$ (%) для SOG пленок облученных ионами азота.

D, cm^{-2}	$N^+(200 \text{ keV}) \Rightarrow \text{SOG}$			$N^+(300 \text{ keV}) \Rightarrow \text{SOG}$			
	n	k	$\Delta d / d_0$	D, cm^{-2}	n	k	$\Delta d / d_0$
1×10^{13}	1.450	0	3,0	1×10^{13}	1.430	0	1
5×10^{13}	1.460	0	9,9	5×10^{13}	1.435	0	5
1×10^{14}	1.470	0	12	1×10^{14}	1.510	0.001	20,3
5×10^{14}	1.470	0.005	14,6	5×10^{14}	1.585	0.002	26,2
1×10^{15}	1.475	0.005	16,3	7×10^{14}	1.590	0.006	28,3
5×10^{15}	1.590	0.050	19,4	1.25×10^{15}	1.645	0.01	30,1
-	-	-	-	5×10^{15}	1.535	0.017	31,9

Для сравнения в табл.4 приведены результаты измерений показателя преломления облученного различными дозами протонов с энергией 250 кэВ оксида кремния. Измерения проводились по 4-х зонной методике при трех углах падения лазерного излучения (67° , 68° , 69°).

Таблица 4.

Показателя преломления пленок оксида кремния, облученных N^+ с энергией 250 кэВ.

№ образца	Доза облучения, ион/см ²	Показатель преломления n
1	5×10^{14}	1,455
2	1×10^{15}	1,454
3	5×10^{15}	1,456
4	1×10^{16}	1,448
5	5×10^{16}	1,438

Из таблицы видно, что изменение параметров пленки наступило только при дозах облучения 10^{16} и 5×10^{16} ион/см². Уменьшение показателя преломления облученного слоя оксида также наблюдалось в [7]. Поэтому можно говорить о некоторых аналогиях поведения показателя преломления SiO_2 и SOG-пленок. А именно, при высоких дозах показатель преломления начинает уменьшаться.

Выводы

1. Показано, что ионное облучение приводит к увеличению коэффициента преломления SOG-

пленок. Это делает возможным их использование не только в качестве покровных, но и волноводных слоев диэлектрических микроволноводов.

2. Результаты по кинетике радиационного травления SOG-пленок представляются весьма перспективными для замены в технологиях изготовления МЭМС синхротронного излучения на протонное.

Список литературы

1. Proceedings of SPIE Volume: 4805, Design and Fabrication of Planar Optical Waveguide Devices and Materials Editor(s): R. A. Norwood, Nov 2002. P. 14.
2. Соборовер Э.И., Зубков И.Л. Высокоэффективная конструкция плосковолноводного оптического химического сенсора // Датчики и системы. 2003, вып.4. С. 2-7.
3. Комаров Ф.Ф., Леонтьев А.В. // ДАН Б, 2008, т.52, №5, с.44.
4. T. Homma, H. Kondo, M. Sakamoto, M. Nomoto, K. Inohara, Y. Ariyama, M. Itoh and H. Takahashi / Opt. Rev. Vol. 7, No. 6 (2000) 505-51.
5. Rahman M. M., Tero R., Urisu T. // Microprocesses and Nanotechnology Conference, 2003. Digest of Papers. 2003 International. Volume, Issue, 29 - 31 Oct. 2003. P. 254 - 255.
6. Pignataro B., Pivin J.-C., Marletta G. // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res., 2002. B 191. P. 772.
7. Sum T.C, Bettiol A.A., J.A. van Kan et al. // Appl. Phys. Lett., 2003. Vol. 83, N 9. P. 1707.

STRUCTURE AND OPTICAL PROPERTIES OF SOG-FILMS IRRADIATED BY ACCELERATED IONS

A.V.Leontyev¹, N.A.Krekoten², Y.S.Leontyeva³

¹Belarussian State University, pr.Nezavisimosty, 4,220080, Minsk, Belarus

²STC Belmicrosistemi, Kazinets Sq., 220064, Minsk, Belarus

³Research Institute of Radiomaterials, Kizhevatova St. 86, 220024, Minsk, Belarus

The results of investigation of optical constant changes for SOG -films irradiated with light ions are presented. It was shown that ion implantation is effective method for modification of optical properties of SOG-films.