

УДК 621.3

А.В. ЛЕОНТЬЕВ

ЭФФЕКТ ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

The result of investigations of the optical properties of the siliconorganic films irradiated by phosphorus, arsenic and stibium ions was presented. The long-range effect is detected during the analization of optical properties of SOG-films irradiated by heavy ions. The theoretical explanation of this phenomenon is done.

Эффект дальнего действия (ЭД) обычно сопровождает ионно-лучевую модификацию металлов и сплавов в случае высокодозной ($D > 10^{17}$ ион/см²) ионной имплантации и достаточно высоких плотностей ионного тока [1]. Имеется очень небольшое количество экспериментальных данных, касающихся обнаружения этого эффекта при облучении полупроводниковых и диэлектрических материалов [2]. Адекватная теоретическая модель ЭД в настоящее время отсутствует. Среди моделей, в соответствии с которыми делаются попытки объяснить данное явление, обычно выделяют три основные: диффузионная, ударная и модель волны переключения. Авторами [3] предпринята попытка описания ЭД на основе расширенной необратимой термодинамики. Большое количество теоретических моделей свидетельствует о сложности данного эффекта, а также о недостаточном количестве надежных экспериментальных данных, относящихся в первую очередь к неметаллическим материалам. Еще менее известен эффект малодозного дальнего действия (ЭМД) [4], экспериментальные данные по которому в литературе практически отсутствуют. Если такой эффект существует, то наиболее вероятно его проявление в экспериментах по ионно-лучевой модификации оптических свойств диэлектрических материалов. Оптические свойства приповерхностных слоев диэлектриков, особенно полимеров, начинают претерпевать изменения уже при дозах облучения выше 10^{13} ион/см², что делает их весьма перспективными объектами для исследований.

В настоящей работе представлены экспериментальные результаты по модификации оптических свойств пленок кремнийорганических соединений класса «Spin-on-Glass» (SOG), широко

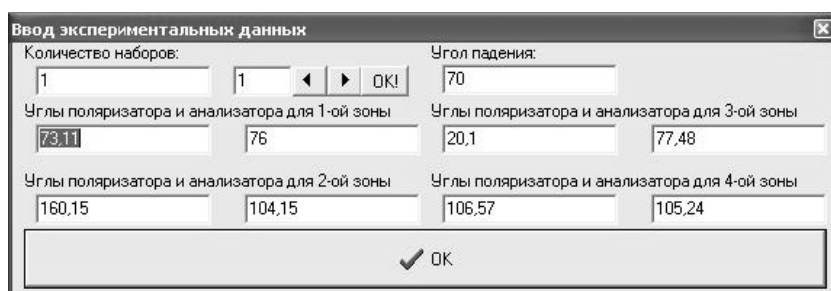


Рис. 1. Окно программы ELLIPS для задания измеренных углов анализатора и поляризатора при четырехзонной схеме измерения

применяемых в современной микроэлектронике для планаризации поверхности, изоляции и в ряде других технологических процессов. Для эксперимента использовали пленки фирмы «FILMTRONICS» (SOG SF) серии метилсилоксанов, содержащих 10÷15 вес. % CH_3 групп, связанных с атомами кремния. Перед нанесением пленок методом центрифугирования

раствор SOG фильтровался. Толщина исходных пленок SOG измерялась на приборе MPV-SP спектрофотометрическим методом (погрешность ~ 10 %). Угол падения света составлял 90° . Оптические константы (n , k) исходных пленок SOG контролировали методом лазерной эллипсометрии (ЛЭФ-3М). Для решения обратной задачи эллипсометрии разработан программный комплекс ELLIPS, предназначенный для быстрого расчета толщины и оптических констант тонких диэлектрических пленок. Использование прецизионной 4-зонной схемы измерений при нескольких углах ($60\div 73^\circ$) падения лазерного излучения обеспечивает высокую точность метода. Пример рабочего окна программы приведен на рис. 1. Экспериментальное значение коэффициента преломления исходных SOG-пленок для всех приготовленных образцов находится в пределах $n_0=1,41\div 1,42$. Дополнительно толщину некоторых облученных пленок определяли с помощью профилометра-профилографа TALYSTEP. Толщина пленок SOG, определенная по обоим методикам, различается не более чем на 1÷3 нм. Полученные пленки подвергали бомбардировке ионами фосфора, мышьяка и сурьмы с энергиями, приведенными в табл. 1. В колонке, соответствующей потерям энергии, приведены две цифры. Первая отражает неупругие потери энергии на входе в мишень, вторая – упругие потери энергии. Коэффициенты физического распыления являются только ориентировочными величинами из-за трудностей их точного расчета в полимерных материалах [5].

Таблица 1

Проецированный пробег R_p , страгглинг ΔR_p , потери энергии $[dE/dx]$, коэффициент физического распыления Y_f для ионов фосфора, сурьмы и мышьяка в SOG-пленках

Ион (Энергия), кэВ	R_p , нм	ΔR_p , нм	$[dE/dx]$, эВ/нм	Y_f
$\text{P}^+(80)$	145	50	200/270	1,5
$\text{As}^+(100)$	91	28	130/1004	4,0
$\text{Sb}^+(60)$	47	11	91/1520	5,6

Ранее [6] при обработке данных эллипсометрических измерений пленок SOG, облученных легкими ионами, допускалась однородность оптических свойств облученного слоя. Эта модель соответствует действительности при бомбардировке легкими ионами, где величина неупругих потерь энергии практически постоянна по глубине и проецированный пробег существенно превышает толщину модифицируемой пленки. Такой подход не может быть применен для расчета оптических констант пленок SOG, облученных более тяжелыми ионами (P^+ , As^+ , Sb^+) с энергиями, приведенными в табл. 1, так как толщина пленки существенно превышает проецированный пробег. Кроме того, в зависимости

a *b*

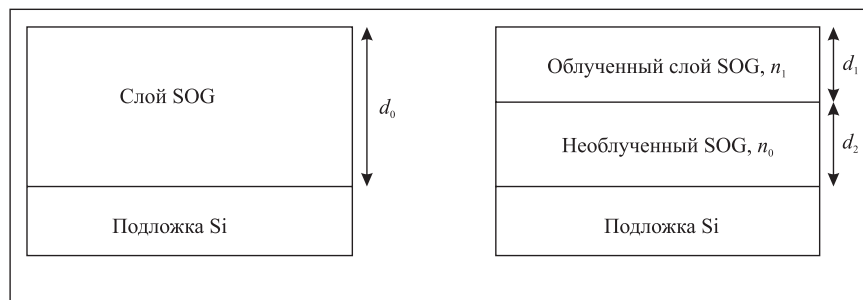


Рис. 2. Двухслойная модель обработки данных спектральной эллипсометрии

от глубины меняются не только потери энергии, но и соотношение их основных составляющих (электронные, ядерные). Построение адекватной модели расчета оптических констант для такой системы крайне затруднительно. Поэтому мы использовали модель, схематически изображенную на рис. 2, согласно которой пленка SOG разделяется на две части – об-

лученную, характеризующуюся эффективным коэффициентом преломления n_1 и толщиной d_1 , и необлученную с коэффициентом преломления исходного материала n_0 и толщиной d_2 .

Эллипсометрические спектры $\text{tg}\Psi(\lambda)$ и $\text{Cos } \Delta(\lambda)$ в диапазоне 380–1000 нм исходных и облученных SOG-пленок регистрировались спектральным эллипсометром с бинарной модуляцией состояния поляризации ES-2 (Фрязино, Россия). Для обработки данных спектральной эллипсометрии и расчета оптических функций $n(\lambda)$ и $k(\lambda)$ исследуемых образцов использовалась прилагаемая к спектрометру программа SPEL. Результаты компьютерной обработки спектров $\text{tg}\Psi(\lambda)$ и $\text{Cos } \Delta(\lambda)$ показали, что спектры $n_1(\lambda)$ для всех облученных пленок SOG имеют классический вид и величина коэффициента поглощения при $\lambda = 632,8$ нм составляет менее 10^{-2} . Рассчитанные значения коэффициента преломления n_1 и толщины d_1 модифицированного слоя SOG, значения толщины не модифицированного слоя SOG, а также величины абсолютного $\Delta d = d_0 - (d_1 + d_2)$ и относительного $\Delta d/d_0$ изменения толщины пленок приведены в табл. 2. Из содержащихся в ней данных следует, что коэффициент преломления пленок SOG при облучении тяжелыми ионами (As, Sb) незначительно превышает величины, достигнутые при облучении протонными пучками [6]. Это может быть связано с тем, что, как установлено в работе [7], эффективность неупругих потерь энергии в смысле модификации оптических свойств полимеров по сравнению с упругими существенно более высокая.

Таблица 2

Толщина и оптические константы пленок SOG, облученных ионами фосфора, мышьяка и сурьмы ($\lambda = 632,8$ нм)

№ образца	Тип иона, энергия	Доза, мкКл	d_0 , нм	n_1 ; d_1 , нм	d_2 , нм	Δd , нм; ($\Delta d/d_0$, %)
1	P ⁺ (80 кэВ)	100	453	1,53; 157	242	54(12)
2		200	446	1,52; 157	237	52(12)
3		300	448	1,52; 154	234	60(13)
4	As ⁺ (100 кэВ)	800	363	1,56; 124	149	90(25)
5		1600	358	1,61; 121	136	101(28)
6		2400	361	1,60; 120	120	121(34)
7	Sb ⁺ (60 кэВ)	150	433	1,52; 97	315	21(5)
8		300	425	1,53; 94	303	28(7)
9		450	449	1,51; 95	321	33(7)

При облучении ионами мышьяка и сурьмы доминируют упругие потери энергии (см. табл. 1). Согласно табл. 2 толщина модифицированного ионным облучением слоя SOG (d_1) превышает проецированный пробег соответствующих ионов. Наиболее сильно (до $2R_p$) этот эффект проявляется при облучении ионами сурьмы. Отметим также, что рассчитанные значения коэффициента распыления с использованием данных Δd (см. табл. 2) близки к приведенным в табл. 1. Для исключения возможной ошибки в определении величины R_p были получены спектры Резерфордского обратного рассеяния (РОР) ионов гелия от имплантированных пленок SOG (рис. 3). Обозначения Si_I и Si_{II} отвечают сигналам, исходящим от атомов кремния, содержащихся в пленке SOG и подложке соответственно. Полученные из спектров РОР экспериментальные значения проецированных пробегов для ионов мышьяка и сурьмы согласуются с расчетными с точностью до 10%. При определении траекторных параметров внедряемых частиц (см. табл. 1) плотность пленки полагалась равной $1,75 \text{ г/см}^3$, а стандартного оксида кремния, к которому пленка SOG приближается по своему составу при облучении, – $2,32 \text{ г/см}^3$. Приведенные в табл. 1 значения R_p завышены, поэтому можно говорить о проявлении эффекта малодозового дальнего действия (МЭД) при имплантации в SOG-пленки ионов сурьмы и в некоторой степени ионов мышьяка. Вели-

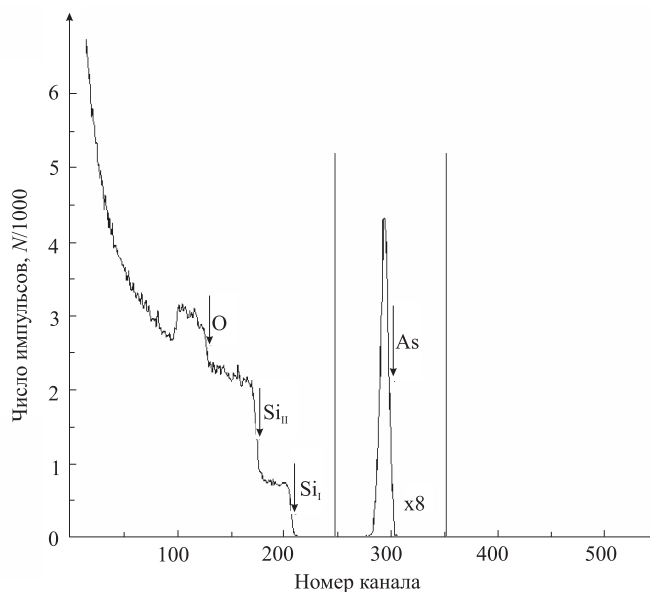


Рис. 3. РОР-спектр пленки SOG, облученной ионами мышьяка

чина наблюдаемого эффекта не столь велика, как в обычных ЭД [1], но дозы облучения и токи пучка ионов ($1 \div 10$ мкА/см²) в нашем случае ниже на несколько порядков.

Физическое объяснение этого феномена может быть связано с рядом рассмотренных в [1–3] эффектов, а также с привлечением новых механизмов, связанных с особенностями структуры исследуемого материала. Один из описанных в [1] механизмов ЭД – изменение состава, обусловленное ионным облучением, работает и в данном случае. Это напрямую подтверждается данными ИК-спектроскопии по уменьшению количества метильных групп и косвенно – данными ВИС по выходу продуктов травления, свидетельствующему о потере водорода при ионном облучении [6]. Но в полимерных материалах возможен иной, не описанный в [1–3] механизм. Он связан с наличием в SOG-пленках значительного количества легких атомов (O, C, H). В этом случае при упругом столкновении с бомбардирующей частицей энергия, переданная первично выбитому атому (ПВА), пойдет в основном на неупругие процессы. Пример таких «ионизационных каскадов», при которых происходит трансформация упруго переданной энергии атому мишени в неупругую составляющую, выделяемую в электронную подсистему, рассмотрен нами ранее [8]. В этом случае легкий ПВА может практически без упругих столкновений пролететь несколько сотен нанометров, теряя энергию в результате неупругих процессов. Особенность такой энергетической трансформации заключается в том, что оптические свойства полимерных композиций более чувствительны к неупругой составляющей энергетических потерь заряженных частиц [7]. Моделирование показало, что эффективная зона баллистического проникновения атомов отдачи водорода, углерода, кислорода и кремния может достигать при облучении пленок SOG ионами сурьмы 100 нм, а ионами мышьяка – до 200 нм. Иначе говоря, слои полимера, лежащие значительно ниже R_p , при бомбардировке тяжелыми ионами (As, Sb) интенсивно облучаются атомами отдачи. Возможен также специфический для системы «диэлектрическая пленка на полупроводниковой подложке» механизм, описанный в работе [2], связанный с формированием объемных положительных и отрицательных зарядов. Вклад каждого из рассматриваемых механизмов в данный эффект разделить весьма сложно, и это будет являться задачей дальнейших исследований.

Таким образом, изучение оптических свойств кремнийорганических пленок имеет не только прикладное значение, связанное с формированием на их основе диэлектрических микроволноводов для устройств интегральной оптики, но может также служить основой для изучения чрезвычайно сложных эффектов малодозового дальнего действия при ионно-фотонном воздействии на диэлектрики.

Работа частично была поддержана БРФФИ (проект T07-239). Автор благодарит А.С. Камышана за проведение экспериментов по POP.

1. Мартыненко Ю.В. // Итоги науки и техники. Пучки. Заряженные частицы и твердое тело. 1993. Т. 7. С. 82.
2. Барабан А.П., Малявка Л.В. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 20. С. 26.
3. Крылов П.Н., Лебедева А.А. // ВУУ. Сер. Физика. 2006. № 4. С. 29.
4. Тетельбаум Д.И., Трофимов А.А., Фазов А.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 23. С. 9.
5. Komarov F.F., Leontyev A.V., Grigoriev V.V., Kamishan M.A. // NIM. 2002. Vol. B191. P. 728.
6. Комаров Ф.Ф., Леонтьев А.В. // ДАН Беларуси. 2008. Т. 52. № 5. С. 44.
7. Biersack J.P., Kallweit R. // NIM. 1990. Vol. B46. № 1-4. P. 309.
8. Леонтьев А.В. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2000. С. 15.

Поступила в редакцию 03.04.09.

Александр Викторович Леонтьев – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники.