

величина принимает значения  $\gamma=290\pm 75\text{ с}^{-1}$  для  $^{215}\text{Po}$  и  $\gamma=220\pm 75\text{ с}^{-1}$  для  $^{216}\text{Po}$ , которые хорошо согласуются между собой, при этом ее  $\gamma_{\text{ср}}\approx 255\text{ с}^{-1}$ .

\*\*\*

При условии равномерного образования аэрозолей ДПР в камере сбора и постоянных внешних условиях изложенный метод можно применить для описания процесса электростатического осаждения первых короткоживущих ДПР изотопов радона  $^{215}\text{Po}$ ,  $^{216}\text{Po}$  и  $^{218}\text{Po}$ . Выражение (6) может быть получено для других конфигураций электростатических полей (сферической, цилиндрической).

Разработанная модель позволяет проводить оценку эффективности электростатического сбора ионов радиоизотопов. Полученные в ходе расчета выражения можно использовать для определения зависимости эффективности сбора ионов ДПР от параметров окружающей среды (давления, влажности, температуры, внешнего радиационного фона, содержания атмосферных аэрозолей) [6, 7, 9].

1. Howard A.J., Carrol S.E., Strange W.P. // Am. J. Phys. 1991. Vol. 59. № 6. P. 544.

2. Pereira E.B., Da Silva H.E. // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A. 1989. 280. № 2-3. P. 503.

3. Shiraishi F., Takami Y., Hashimoto T., Siemincki M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1990. Vol. 37. № 2. Pt. 1. P. 878.

4. Лобач Д.И. Метод и средство экспресс-анализа содержания радона в атмосферном воздухе: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мн., 1998.

5. Goldstein S.D., Hopke P.K. // Environ. Sci. and Technol. 1985. Vol. 15. P. 146.

6. Chu K.D., Hopke P.K. // Environ. Sci. Technol. 1988. Vol. 22. P. 711.

7. Porstendorfer J., Dankelmann V., Pagelkopf P. // Proceedings of the Third Eurosymposium on Protection against RADON, 10–11 may 2001. Liege (Belgium), 2001. P. 65.

8. Measurement of Radon and Radon Daughters in Air. Bethesda, 1989. Vol. 97.

9. Изготовить рабочий макет альфа-спектрометра с использованием электрических полей для концентрирования дочерних продуктов распада: Отчет о НИР / Науч. рук. Д.И. Лобач. № госрегистрации 19993185. Мн., 2000.

Поступила в редакцию 02.02.2004.

*Дмитрий Иосифович Лобач* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Международного государственного экологического университета им. А.Д. Сахарова.

*Михаил Дмитриевич Дежурко* – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры ядерной физики.

УДК 621.3

А.В. ЛЕОНТЬЕВ

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРОВОЛНОВОДОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ ПОЛИМЕР/SiO<sub>2</sub>/Si

Physical and mathematical aspects of optimization of the forming process of dielectric micro-waveguides on the basis of polymer/SiO<sub>2</sub>/Si system with the usage of ion irradiation technology is presented. The chance sequence of parameters of implanted particles is shown. This sequence allows to simplify development of technological aspects of the formation of stepped and gradient micro-waveguides on the basis of considered system.

В настоящее время в технологии интегральной оптики (ИО) и интегральной оптоэлектроники для обеспечения функционирования различных устройств обычно используют гибридные многослойные системы [1]. При

формировании микроволноводов применяют ряд неорганических материалов, подробные сведения о которых можно найти в [2]. Особый интерес представляют следующие гибридные микроволноводные структуры: полимер/SiO<sub>2</sub>/Si-подложка [3], полимер/Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/полимер [4], а также композиции на базе металлизированных полиимидных пленок [5]. В качестве полимерных материалов используют поликарбонаты [6], фторированные полиимиды [7], CR39, HIRI [8] и другие полимерные композиции [9]. Основными методами формирования волноводных структур в настоящее время являются: эпитаксия и ионный обмен из расплава, диффузия и ионная имплантация [2]. Методом эпитаксии можно получать ступенчатые волноводы. Ионный обмен, диффузия и ионная имплантация, за исключением специальных режимов, обычно дают градиентные структуры. Для удешевления технологического процесса изготовления изделий ИО в качестве диэлектрика целесообразно использовать тонкие пленки термически выращенного оксид кремния (SiO<sub>2</sub>), обладающие высокой прозрачностью в видимой области, прекрасной термостабильностью. Методы получения SiO<sub>2</sub> (высокотемпературные и низкотемпературные) достаточно хорошо отработаны и дают возможность формировать слои в широком диапазоне толщины. В то же время показатель преломления SiO<sub>2</sub> находится в пределах  $n=1,46-1,48$  (в зависимости от метода получения), что не позволяет использовать его в качестве волноводного слоя на подложке из стекла, кремния ( $n=3,5$ ) или другого полупроводникового материала. Оксид кремния может играть роль переходного слоя от подложки (с высоким коэффициентом преломления) к волноводному слою, имеющему величину  $n$  большую, чем у SiO<sub>2</sub>, но меньшую, чем у подложки. В этой связи весьма перспективны полимерные материалы, особенно если вводимая в микроволноводы на их основе энергия не приводит к структурным изменениям в них.

Целью настоящей работы является разработка физико-математических аспектов оптимизации процесса формирования диэлектрических микроволноводов на основе системы полимер/SiO<sub>2</sub>/Si-подложка с применением технологии ионного облучения в сочетании с фотолитографией.

#### Результаты и их обсуждение

В качестве волноводного слоя в системе полимер/SiO<sub>2</sub>/Si-подложка можно применять полимеры, имеющие более высокий коэффициент преломления, чем у оксида кремния, или модифицировать оптические свойства таких полимеров, как полиметилметакрилат (ПММА) или полистирол (ПС), ионным облучением [10–13]. Из полимеров, обладающих достаточно высоким коэффициентом преломления, обычно выбирают различные полиимидные композиции с ориентировочной формулой  $[C_{22}H_8O_5N_2]_n$ . Данный класс соединений обладает хорошей термостабильностью свойств, но имеет невысокую прозрачность в видимой области, и его адгезия к ряду материалов электронной техники является недостаточной. Поэтому ионное легирование целесообразно использовать для повышения коэффициента преломления ПММА [10] или полиметакрилметилимида (ПММИ) [11]. Важным требованием, предъявляемым к материалам диэлектрических микроволноводов, является величина оптических потерь, которая для практически приложений не должна превышать 1 дБ/см. Это значительно сужает круг исходных материалов, так и возможности ионно-лучевых технологий в связи с увеличением коэффициента экстинкции ( $k$ ) полимеров с ростом дозы облучения. Свойства некоторых наиболее перспективных органиче

ских материалов приведены в табл. 1. На основании данных таблицы следует выделить поливинилкарбазол, обладающий нелинейными оптическими свойствами [14]:  $n=n_0+\alpha I$  ( $I$  – интенсивность излучения,  $n_0$  – коэффициент преломления при низких значениях  $I$ ,  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности). Весьма перспективным материалом является также негативный фоторезист SU-8 [15] с хорошей термостабильностью ( $T_g > 200$  °С). С технологической точки зрения весьма удобно использовать современные высоко разрешающие позитивные фоторезисты S1813, SPR135, SPR700 и другие композиции на основе новолачной смолы.

Таблица 1

Характеристики полимерных волноводных слоев

Материал волноводного слоя	$n$	Потери, дБ/см	Ссылка	Материал волноводного слоя	$n$	Потери, дБ/см	Ссылка
Винил-метилсилан	1,52–1,53	0,04	[1]	SU-8	1,596	0,5–0,6	[13]
Гексаметил-дисилоксан	1,48	0,04	[1]	CR-39	1,493	1,0–1,2	[8]
Желатин	1,54	0,5	[1]	HIRI	1,560	2,0–3,0	[8]
S1813, SPR135, SPR700	1,58–1,63	< 2,0	[16]	Поликарбонат	1,582	3,0–3,8 < 1	[8] [6]
Поливинилкарбазол	–	< 1	[12]	PMMI	1,48–1,50	1	[11]
Эпоксидная смола	1,58	0,3	[1]	Полиимиды	1,76–1,82	1–3	[17]
Полиметил-метакрилат	1,48	1,0–2,3	[11]	Полистирол	1,57–1,58	0,5–1,0	[16]

Одним из основных недостатков метода ионного легирования для формирования структур с изменяемым по глубине коэффициентом преломления является скачок  $n$  в конце траектории движущихся частиц в области доминирования упругих потерь энергии. Данную проблему в зависимости от соотношения таких параметров, как толщина функциональных слоев, возможности технологического оборудования, требуемого значения  $\Delta n$  и рабочего диапазона температур мы предлагаем решить двумя способами.

Во-первых, можно использовать традиционные условия ионного облучения, заключающиеся в имплантации ионов МэВ-х энергий в хорошо известные неорганические диэлектрики [16]. Этот метод, безусловно, перспективный в связи с равномерностью потерь энергии в волноводном слое, но неосуществимый в современных технологических условиях, так как имеющиеся промышленные модели ускорителей работают в кэВ-м диапазоне энергий, т. е. упругие и неупругие потери энергии могут быть сравнимы друг с другом. Кроме того, для модификации оптических свойств неорганических диэлектриков (НД) требуются очень высокие дозы облучения. Так, при облучении НД ионами средних масс в диапазоне энергий (0,1–1) МэВ для изменения коэффициента преломления на 1 % необходима доза облучения порядка  $(0,1–1)10^{16}$  см<sup>-2</sup>, что при имплантации даже ионов гелия приводит к существенному скачку  $\Delta n$  в конце траектории из-за упругих потерь энергии [16].

Во-вторых, использование полимерных материалов в качестве волноводного слоя позволяет практически полностью решить эту проблему. Доза, требуемая для изменения показателя преломления на 1 %, на три порядка



меньше [10, 17], чем при использовании НД, что достигается облучением протонами или ионами гелия, для которых во всем приемлемом для технологии диапазоне энергии  $[dE/dx]_e \gg [dE/dx]_n$ .

Для расчета параметров внедряемых частиц выделенной энергии использовалась программа SRIM-2003.24 ([www.srim.org](http://www.srim.org)), которая реализует метод Монте-Карло (МК) в применении к имплантации аморфных материалов. Преимущества данного комплекса перед другими аналогичными программами заключается в использовании модифицированного правила Брэга – Климана, что особенно важно при моделировании высокоэнергетического ионного облучения органических материалов. Применение развитого в работе [18] подхода, так называемого Core-and-Bond-алгоритма, в сочетании с данными [19] по сечению торможения на химических связях делает данный комплекс незаменимым при моделировании взаимодействия заряженных частиц с высокомолекулярными соединениями. Моделируя условия ионного облучения структуры полимер/SiO<sub>2</sub>/Si-подложка, будем исходить из толщины волноводной пленки 1 мкм и толщины слоя термически выращенного оксида 0,7 мкм.

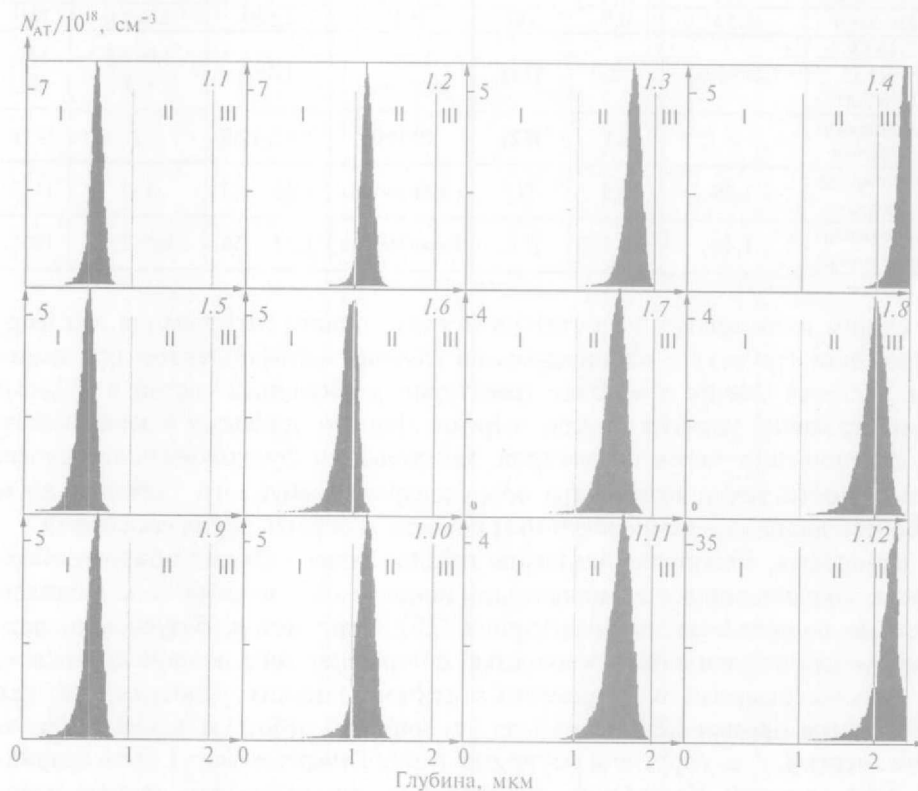


Рис. 1. Распределения ионов H<sup>+</sup>, He<sup>+</sup> и N<sup>+</sup>, имплантированных в систему ПММА (1,0 мкм) – I/SiO<sub>2</sub> (0,7 мкм) – II/Si-подложка – III:  
 1.1–1.4 – H<sup>+</sup> с энергией 50, 100, 150 и 200 кэВ соответственно; 1.5–1.8 – He<sup>+</sup> с энергией 50, 100, 200 и 300 кэВ;  
 1.9–1.12 – N<sup>+</sup> с энергией 200, 400, 600 и 1000 кэВ соответственно

В зависимости от соотношения энергии внедряемых частиц и толщины слоев в системе полимер (I)/SiO<sub>2</sub> (II)/Si-подложка (III) возможны четыре различных типа их распределения: 1 – частицы затормозятся в слое I полностью; 2 – частицы останутся в основном в слое II и частично – в I (или наоборот); 3 – частицы затормозятся в слое II с небольшим «хвостом» рас-

предела в подложку; 4 – практически все ионы останутся в подложке. Различные типы распределения легких ионов, внедренных в трехслойную систему ПММА (1,0 мкм)/SiO<sub>2</sub> (0,7 мкм)/Si-подложка, рассчитанные методом МК, приведены на рис. 1. Для оптимизации технологии формирования диэлектрических микроволноводов в анализируемой системе распределение внедренных частиц не так важно, как распределение энергии, выделенной в результате упругих и неупругих столкновений. В частности, при совершенно разном распределении внедряемых частиц эффект их действия на верхнюю полимерную пленку может быть один и тот же. Поскольку речь идет об облучении легкими высокоэнергетичными частицами, то упругими потерями энергии в первом приближении можно пренебречь. В этой связи главное, чтобы максимум упругих потерь энергии (который появляется в конце траектории внедряемых частиц) не попал в волноводный слой, иначе возможен нежелательный скачок  $\Delta l$ . На рис. 2 приведены рассчитанные методом МК распределения неупругих потерь энергии для описанных ранее случаев. Вклад атомов отдачи не показан из-за его малости. Видно, что

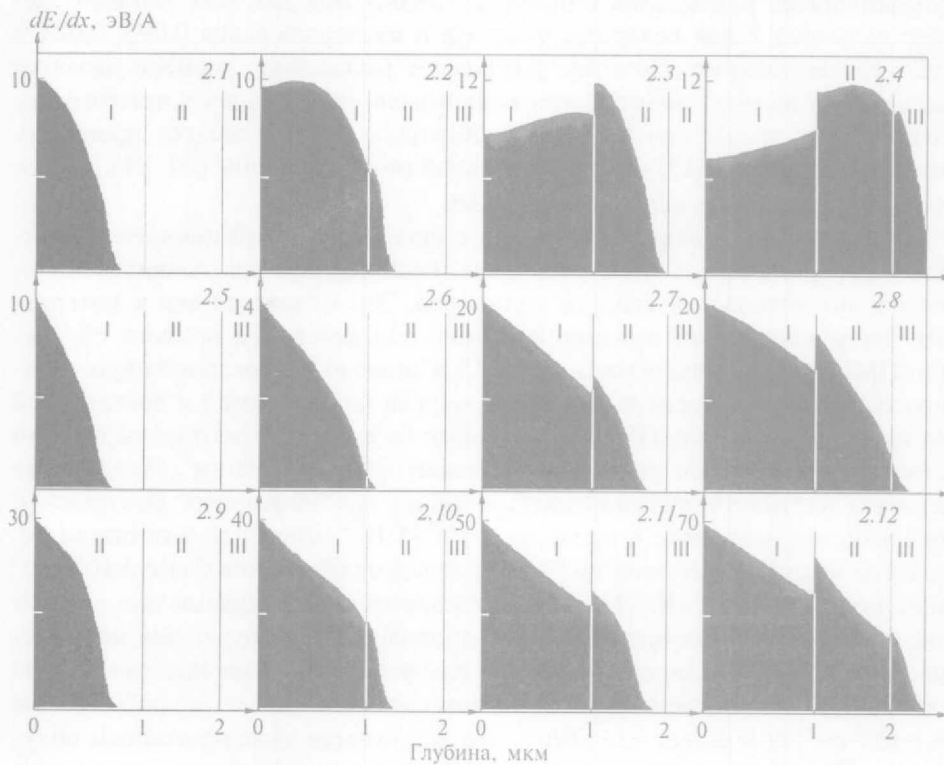


Рис. 2. Распределения неупругих потерь энергии для условий ионного облучения, приведенных на рис. 1

практически для всех рассмотренных условий ионного облучения (за исключением 2.3, 2.4) будут сформированы структуры, соответствующие градиентным волноводам. Как следует из приведенных рисунков, полиэнергетическая имплантация частиц одного сорта в рассматриваемом диапазоне энергий не дает возможности получить структуру со ступенчатым изменением коэффициента преломления, хотя сформировать характерную «полочку» в распределении внедренных частиц возможно. В то же время *полиион-*

ная имплантация, например комбинация распределений 1.2 и 1.5, даст возможность создать близкое к однородному распределение выделенной энергии, что будет являться необходимым условием формирования ступенчатых волноводных структур.

Таким образом, первый этап моделирования ионного облучения рассматриваемой системы заключается в определении типа имплантируемых ионов и их энергий. Возможности выбора обычно определяются параметрами имплантера. При прочих равных условиях лучше использовать более легкие ионы, так как усадка ( $\Delta d$ ) полимера будет минимальной [17]. Необходимо отметить, что прогнозировать ее величину, исходя из данных по расчету коэффициента распыления с помощью SRIM-алгоритма, невозможно, так как последний учитывает только механизм физического распыления. Эффективный коэффициент распыления равен:  $Y = \Delta d N / D$ , где  $\Delta d$  – величина усадки,  $N$  – атомная плотность мишени,  $D$  – доза облучения. При облучении ПММА ионами  $N^+$  (300 кэВ) при  $D = 10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>  $\Delta d = 0,1$  мкм [17]. Подставляя  $N = 10^{23}$  ат./см<sup>3</sup>, получим  $Y = 10^3$ . Из расчета парциальных коэффициентов распыления с помощью SRIM-2003 для этих условий следует: величина  $Y$  для водорода, углерода и кислорода равна 0,095, 0,023 и 0,025 соответственно. Поэтому физическое распыление мишени является лишь одним из малозначительных механизмов, приводящих к прямому радиационному травлению полимеров. Контроль усадки следует проводить методами лазерной [17] или спектральной эллипсометрии [20, 21], позволяющими определить величины  $n$ ,  $k$  и  $\Delta d$ .

Второй этап моделирования связан с оценкой условий ионного облучения, в первую очередь дозы облучения, необходимой для конкретной модификации оптических свойств полимеров. Это относится как к материалам, деструктурирующим преимущественно под действием ионного облучения (ПММА), так и сшивающимся (ПС). Согласно [22] величина критического значения плотности выделенной энергии, необходимой и достаточной для проявления резиста ПММА, составляет (в зависимости от модификации резиста, растворителя, условий облучения) около 15 эВ/нм<sup>3</sup>. Аналогично величина плотности энергии гелеобразования для негативных электроно- и ионорезистов находится в пределах  $4 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{22}$  эВ/см<sup>3</sup>. Как показали результаты наших экспериментов [10, 17], при дозе облучения более  $5 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> такие полимеры, как ПММА и ПС, становятся непригодными для использования в качестве материала микроволноводов из-за увеличения поглощения. С учетом доминирования неупругих потерь энергии практически на всей длине пути ионов в мишени минимальное значение  $[dE/dx]_e$  для  $D = 1 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> составляет  $\approx 15$  эВ/нм, что достигается даже протонным облучением. При таких малых дозах существенных изменений оптических констант оксида кремния не наблюдается. Поэтому при расчете числа мод ( $M$ ), распространяющихся, например, в ступенчатом волноводе,  $M = 1/2 + (2d/\lambda_0)[2n_3(n_2 - n_1)]^{1/2}$ , где  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$  – коэффициенты преломления воздуха, модифицированного полимера и оксида кремния соответственно, принимать во внимание изменение  $n_3$  нет необходимости для всех приведенных на рис. 1, 2 случаев распределения внедренных частиц и выделенной энергии. Так, для  $\lambda_0 = 0,6328$  мкм (рабочая длина волны лазерного эллипсометра ЛЭФ-3М) при толщине волноводного слоя  $d = 1,0$  мкм и  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,6$  ( $N^+$  – 300 кэВ,  $D = 2 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup> [17]),  $n_3 = 1,48$  получаем  $M = 2$ .



При формировании 3D-волноводных структур важным параметром является отношение скоростей растворимости облученного и исходного полимера ( $S/S_0$ ), для расчета которого можно использовать понятие радиационно-химического выхода деструкции ( $G_{SC}$ ) для позитивных композиций и сшивки ( $G_{CL}$ ) – для негативных. В случае позитивных резистов (ПММА и др.), у которых  $G_{SC} \gg G_{CL}$ , средний молекулярный вес облученного полимера  $M_n^*$  определяется выражением:

$$\frac{1}{M_n^*} = \frac{1}{M_n} + \frac{DEG_{SC}}{kqtN_A\rho}, \quad (1)$$

где  $M_n$  – средний молекулярный вес исходного вещества,  $D$  – доза облучения, Кл/см<sup>2</sup>;  $E$  – поглощенная энергия, эВ;  $k=100$  эВ,  $q$  – заряд электрона;  $\rho$  – плотность полимера, г/см<sup>3</sup>;  $t$  – толщина пленки, см;  $N_A$  – число Авогадро.

При использовании соотношения (1) значение поглощенной энергии можно найти методом МК. Наименее точно определенной величиной является  $G_{SC}$ . Данные ряда исследований существенно различаются [22–26]. В табл. 2 представлены наиболее часто используемые значения  $G_{SC}$  и  $G_{CL}$  для ПММА и ПС [23, 24]. Энергия  $E_1$  соответствует поглощенной энергии в пленке полимера,  $E_2$  – плотность поглощенной энергии. Данные табл. 2 позволяют в случае облучения легкими ионами ( $Z=1-10$ ) определить  $M_n^*$ . Видно, что при ионной бомбардировке величина  $G_{SC}$  меньше, чем при облучении электронами или протонами. Данный вывод, с нашей точки зрения, является не совсем корректным, так как сравнение эффективности протонов и перечисленных в табл. 2 ионов следовало проводить не при равенстве энергии бомбардирующих частиц, а их скоростей. Боровская скорость  $V_0$  соответствует энергии 25 кэВ/а. е. м. Поэтому скорости всех ионов, приведенных в левой части таблицы, не равны, а именно они определяют величину неупругих потерь энергии. Данные [26], совпадая с представленным в табл. 2 значением  $G_{CL}$  для ПС, облученного электронами, существенно (на порядок) отличаются от данных для аналогичных условий ионной бомбардировки. Еще одним аспектом данной проблемы является вопрос об эффективности упруго и неупруго выделенной энергии по отношению к процессам деструкции в полимерах. Есть основания считать, что радиационно-химический выход деструкции зависит от механизма выделения энергии. Подробно вопросы определения  $G_{SC}$  и  $G_{CL}$  при облучении ионами, имеющие фундаментальное значение для радиационной химии полимеров, будут обсуждены отдельно. Поэтому расчет величины  $M_n/M_n^*$  и соответственно  $S/S_0$  является оценочным, но полезным на стадии планирования разработки.

Таблица 2

Значения радиационно-химического выхода деструкции ( $G_{SC}$ ) и сшивки ( $G_{CL}$ ) для ПММА и ПС [23, 24]

Частица	ПММА			Частица	ПС			
	$E_0$ , кэВ	$E_1$ , кэВ	$G_{SC}$		$E_0$ , кэВ	$D$ , см <sup>-2</sup>	$E_2$ , эВ/мм <sup>3</sup>	$G_{CL}$
e <sup>-</sup>	20	3,07	0,77	e <sup>-</sup>	20	$1 \times 10^{15}$	2	0,08
H <sup>+</sup>	100	92,2	0,74	H <sup>+</sup>	1500	$1 \times 10^{14}$	21	0,06
He <sup>+</sup>	300	217,0	0,45	H <sup>+</sup>	50	$7 \times 10^{14}$	87	0,07
Li <sup>+</sup>	300	117,9	0,44	He <sup>+</sup>	100	$1,5 \times 10^{13}$	160	0,25
Be <sup>+</sup>	300	139,9	0,40	Ne <sup>+</sup>	200	$4 \times 10^{12}$	400	0,26
B <sup>+</sup>	250	144,0	0,45	Ar <sup>+</sup>	400	$6 \times 10^{11}$	750	0,29

Представленная последовательность выбора параметров внедряемых частиц позволит упростить разработку технологических аспектов формирования ступенчатых и градиентных микроволноводов на основе рассматриваемой системы. Прогнозирование изменения оптических параметров полимеров в зависимости от условий облучения возможно как для позитивных, так и негативных композиций [10, 17]. Использование данных спектральной эллипсометрии, позволяющих получить спектры  $n(\lambda)$  и  $k(\lambda)$  [20], даст возможность определить рабочий диапазон устройства.

\*\*\*

Таким образом, моделирование методом Монте-Карло ионного облучения системы полимер/SiO<sub>2</sub>/Si-подложка позволяет оптимизировать условия ионной бомбардировки, включая полиэнергетическое и полиионное облучение. Последнее является наиболее перспективным для формирования ступенчатых микроволноводов с применением эллионной технологии.

1. Свечников Г. С. Элементы интегральной оптики. М., 1987.
2. Townsend P.D., Chandler P.J., Zhang L. Optical Effects of Ion Implantation. Cambridge, 1994.
3. Bosc D., Devoldere N., Bonnel M. et al. // Matter Sci. and Eng. 1999. Vol. 75. P. 155.
4. Chu A.K., Lee K.M., Pong B.J. et al. // Electron Lett. 2000. Vol. 36. № 18. P. 1539.
5. Han Kwansoo, You Kyounghee, Kim Enji // Mol. Cryst. and Lig. Cryst. Sci. and Techn. Sec. (A). 2000. № 349. P. 71.
6. Sharma V.K., Kapoor A., Tripathi K.N. et al. // Indian J. Eng. and Mater Sci. 1999. Vol. 6. № 6. P. 335.
7. Жуков А.А., Здобников А.Е., Клемин С.Н. // Журн. прикл. физ. 2000. № 5. С. 80.
8. Darraud C., Bennamane B., Gagnarde C. et al. // Appl. Optics. 1994. Vol. 33. № 16. P. 3338.
9. Zhao Y.-G., Lu W.-K., Ma Y. // J. Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. № 19. P. 2961.
10. Komarov F.F., Leontyev A.V., Grygoryev V.V., Kamishan M.A // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 2002. B 191. P. 728.
11. Brunner S., Ruck D.M., Tinscert K et al. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1996. B 107. P. 333.
12. Wan Hong, Hyung-Joo Woo, Han-Woo Choi et al. // Appl. Surf. Sci. 2001. Vol. 169–170. P. 428.
13. Biersack J.P., Schmoldt A., Fink D., Schiwietz G. // Rad. Eff. Def. in Sol. 1996. Vol. 140. P. 63.
14. Cottin P., Lessard R.A., Knystautas E.J., Sjoerd Roorda // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1999. B 151. P. 97.
15. Sum T.C., Bettiol A.A., Van Kan et al. // Appl. Phys. Lett. 2003. Vol. 83. № 9. P. 1707.
16. Townsend P.D. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1992. B 65. P. 243.
17. Леонтьев А.В. // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 5. С. 377.
18. Oddershede J., Sabin J.R. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1989. B 42. P. 7.
19. Ziegler J.F., Manoyan J.M. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1988. B 35. P. 215.
20. Ковалев В.И., Леонтьев А.В., Хомич А.В. // Материалы 5-й Междунар. конф. «ВИТТ-2003». Мн., 2003. С. 262.
21. Woollam J.A., Bungay C., Hilfiker J., Tiwald T. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 2003. B 208. P. 35.
22. Иванов В. С. Радиационная химия полимеров. Л., 1988.
23. Calcagno L., Foti G. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1991. B 59/60. P. 1153.
24. Adesida I., Anderson C., Wolf E.D. // J. Vac. Sci. Technol. 1983. B 1(4). P. 1182.
25. Calcagno L., Compagnini G., Foti G. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1992. B 65. P. 413.
26. Aoki Y., Kouchi N., Shibata H. et al. // Ibid. 1988. B 33. P. 799.

Поступила в редакцию 22.03.2004.

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

