

9. Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Киев, 1986.

Поступила в редакцию 19.04.2004.

Константин Германович Батраков – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник НИИЯП БГУ.

Александр Сергеевич Лобко – кандидат физико-математических наук, заместитель директора по научной работе НИИЯП БГУ.

УДК 537.311

А.В. ЛЕОНТЬЕВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАСКАДНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ПРИ ВИМС-АНАЛИЗЕ

The simple algorithm for the evaluation of the value of cascade mixing (ΔX) under SIMS-analysis is suggested. The results of calculation ΔX for the silicon sputtering by cesium and oxygen ions with energies 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 and 15 keV are presented.

Вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС) успешно используется для исследования поверхности металлов и полупроводников [1], а также диэлектрических, в том числе и органических, материалов [2, 3]. Применение в качестве первичных ионов инертных газов [4] не всегда обеспечивало регистрацию ряда слабых, но важных для качественной идентификации линий. Поэтому в настоящее время при проведении ВИМС-анализа для регистрации вторичной отрицательной ионной эмиссии (ВОИЭ) обычно используют ионы Cs^+ и O_2^+ – для регистрации вторичной положительной ионной эмиссии (ВПИЭ) [5]; в ряде случаев [6, 7] для усиления выхода кластерных ионов при распылении углерода, кремния, а также органических материалов применяют кластеры SF_5^+ . В связи с тенденцией миниатюризации в микроэлектронике, наметившимся переходом к наноэлектронике, разработкой методов формирования мелких и сверхмелких переходов имплантацией молекулярных кластеров [8–10] важное значение при проведении ВИМС-анализа приобрел вопрос о разрешающей способности метода по глубине [11–13]. В литературе данный вопрос отражен недостаточно полно. Обычно отмечается, что для повышения разрешения по глубине (ΔX) желательнее снизить энергию падающих ионов [9]. Одним из основных факторов, влияющих на величину (ΔX), является каскадное перемешивание, приводящее к уширению внутренней границы раздела при исследовании многослойных мишеней и распределений имплантированных примесей при движении фронта распыляемой поверхности.

Цель настоящей работы – разработка простой и надежной методики численного расчета эффективности каскадного перемешивания при ВИМС-анализе материалов электронной техники с применением в качестве первичных частиц ионов инертных газов, цезия и кислорода.

Модель и обсуждение результатов

Погрешность разрешения метода ВИМС по глубине, связанная с каскадным перемешиванием ΔX [14], обычно рассчитывается по формуле

$$\Delta X = 2 \times R_d \left[\frac{U_0 \pi^2 (1 + A^2)}{12 E_d A \alpha} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

где R_d – средний радиус каскада, U_0 – поверхностная энергия связи, E_d – пороговая энергия смещения, $A=M_2/M_1$, $\alpha=F(A)$.

Если каскадное перемешивание рассматривать как случайное блуждание частиц [10], то уширение можно рассчитать по формуле [1]:

$$\Delta X = 0,37 R_u \left(\frac{E_p}{Y E_d} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где R_u – среднее расстояние, на которое перемещается выбитый из первоначального положения атом; Y – коэффициент физического распыления; E_p – доля энергии первично выбитого атома, израсходованная на упругие столкновения: $E_p = \dot{\alpha}_v \ln [1 + \varepsilon / (\dot{\alpha}_v + B)]$, $\dot{\alpha}_v = A/k_e$; A и B – константы в известной формуле Юдина для расчета упругих потерь энергии, k_e – константа электронного торможения, ε – приведенная энергия.

Использование формул (1) и (2) дает только приближенную оценку величины (ΔX), так как ряд входящих в них параметров определен весьма неточно. Значения R_d и R_u являются сложной функцией таких параметров, как тип и энергия внедряемых частиц, масса атомов мишени, а также E_d . Величина $\alpha=F(A)$ обычно берется из графика [10]. Кроме того, применение формул (1) и (2) возможно только для монокристаллических материалов. Исходя из сказанного, ожидать удовлетворительной точности расчета ΔX по приведенным формулам не приходится.

Хорошая оценка величины ΔX может быть получена при расчете распыления аморфных мишеней ионными пучками методом Монте-Карло (МК). Для вычисления ΔX можно поступить следующим образом. Сначала необходимо рассчитать распределение атомов отдачи (АО), возникающих при взаимодействии бомбардирующих частиц с атомами мишени. Далее следует определить четыре первых момента функции их распределения: R_p^{AO} , ΔR_p^{AO} , γ и β . Знание величины β весьма важно, так как определяемые им «хвосты» распределений влияют на предельную глубину проникновения АО, а следовательно, и на ΔX . Величина ΔX может быть аппроксимирована значением ΔR_p^{AO} . Рассчитанные моменты функции распределения АО дадут возможность построить для них распределение Пирсона.

Для расчета распределения АО при распылении перечисленными ионами использовалась программа SRIM-2003.24 (www.srim.org), которая реализует метод МК в применении к имплантации аморфных материалов. Программа PIRSON, записанная нами на Delphi, рассчитывает четыре первых момента распределения АО из выходных файлов SRIM-2003.24 и строит соответствующее распределение Пирсона (I–VII). Тип распределения программа выбирает автоматически в зависимости от соотношений между рассчитанными значениями γ и β . Численное моделирование каскадного перемешивания проведено на примере распыления кремния перечисленными ионами. Энергия первичного пучка ионов $E=1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$ кэВ. Данный тип ионов и диапазон энергий выделены в связи с тем, что они используются в наиболее известной установке ВИМС – CAMECA IMS 4F, широко применяемой на НПО «Интеграл» для анализа примесного состава материалов электронной техники [15, 16]. В табл. 1 приведены рассчитанные значения коэффициента физического распыления (Y). Данные табл. 1 отражают зависимость Y от энергии и массы бомбардирующих частиц и неплохо согласуются с известными экспериментальными результатами. Число историй при расчете составляло не менее 10^5 , что достаточно для стабили-

Таблица 1

Коэффициенты физического распыления (Y) кремния, рассчитанные с помощью программы SRIM-2003.24

E , кэВ	Cs^+	O^+	He^+	Ne^+	Ar^+	Kr^+	Xe^+
1	0,54	1,20	0,27	1,29	0,76	0,63	0,55
3	1,29	1,45	0,20	1,66	1,32	1,29	1,27
5	1,72	1,56	0,16	1,63	1,52	1,69	1,71
7	2,08	1,42	0,14	1,76	1,76	1,95	2,00
9	2,33	1,39	0,13	1,69	1,72	2,15	2,27
11	2,39	1,30	0,12	1,63	1,80	2,24	2,47
13	2,69	1,28	0,10	1,64	1,84	2,39	2,66
15	2,82	1,23	0,08	1,57	1,87	2,61	2,74

Таблица 2

Параметры распределения атомов отдачи при распылении кремния ионами цезия

E , кэВ	R_p^{AO} , нм	ΔR_p^{AO} , нм	γ	β
1	2,84	1,24	0,28	2,75
3	4,50	2,16	0,40	2,96
5	5,75	2,85	0,45	3,05
7	6,83	3,45	0,48	3,06
9	7,82	4,02	0,49	3,08
11	8,83	4,54	0,49	3,09
13	9,60	5,00	0,54	3,2
15	10,5	5,45	0,53	3,2

Таблица 3

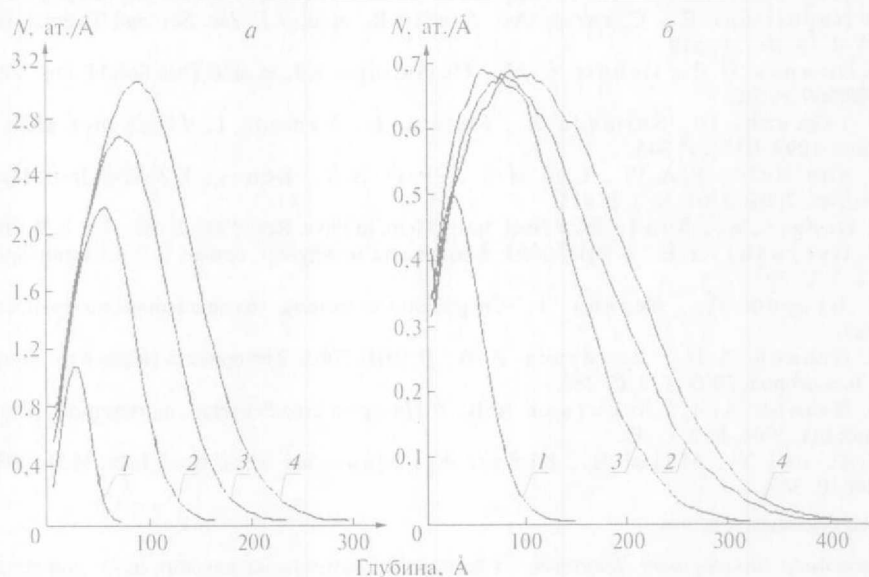
Параметры распределения атомов отдачи при распылении кремния ионами кислорода

E , кэВ	R_p^{AO} , нм	ΔR_p^{AO} , нм	γ	β
1	3,86	2,33	0,79	3,49
3	7,98	4,96	0,79	3,47
5	11,7	7,24	0,71	3,21
7	15,3	9,32	0,66	3,02
9	19,0	11,4	0,65	3,05
11	22,4	13,3	0,62	3,03
13	25,8	15,3	0,58	2,92
15	29,4	17,2	0,52	2,77

условия проведения ВИМС-анализа пленок полукристаллического полиэтилентерефталата (ПЭТ), представленные в [2], нельзя считать чисто статическими, так как доза ионов He^+ (4 кэВ) превышала 10^{13} ион/см². Вероятно, что для многих полимеров, у которых структурные изменения и усадка наблюдаются уже при дозах облучения порядка 10^{11} ион/см², говорить о чисто статических условиях проведения ВИМС-анализа неправомерно.

Аналогичные вычисления проведены для случаев распыления перечисленными ионами и ионами инертных газов следующих широко используемых в микроэлектронике и других отраслях промышленности металлов: Al, Cu, Ni, Ti, V, Mo, Ta, Au, W, Pt. Основные особенности распределения АО те же, что и при распылении кремния. Отметим, что данный метод легко применим для расчета эффективности каскадного перемешивания при анализе сложных многокомпонентных соединений, для которых расчет по формулам (1), (2) практически невозможен. Исключение составляют полимерные материалы и биологические объекты. В последнем случае возникает большая неопределенность с эффективным коэффициентом распыления. Программа SRIM-2003.24, как и все другие версии данного алгоритма реа-

зации значений Y во втором после запятой знаке. В табл. 2, 3 даны величины R_p^{AO} , ΔR_p^{AO} , γ и β для АО, возникающих при распылении кремния ионами цезия и кислорода соответственно. На рис. 1 приведены рассчитанные методом МК распределения атомов отдачи для случая распыления кремния ионами Cs^+ (а) и O^+ (б) с энергией 1, 5, 9 и 13 кэВ. Данные табл. 2, 3 и рисунок показывают, что, хотя глубина проникновения АО и соответственно ΔX для ионов O^+ больше, чем для ионов Cs^+ одной и той же энергии, их абсолютное количество существенно меньше. Так, при распылении ионами Cs^+ даже для $D=1 \times 10^{12}$ ат./см² концентрация АО в максимуме составляет примерно 10^{20} ат./см³, что существенно превышает чувствительность данного метода и может влиять на получаемые профили, особенно в случае динамического ВИМС-анализа. Исходя из приведенных графиков, минимальная доза распыляющих ионов при проведении статического ВИМС (СВИМС) должна быть менее 10^{11} ат./см². В этой связи



Распределение атомов отдачи, возникающее при распылении кремния ионами цезия и кислорода.

1, 2, 3 и 4 соответствуют энергиям пучка частиц 1, 5, 9 и 13 кэВ соответственно

лизации метода МК, рассчитывает только физический коэффициент распыления. Для полимеров приходится вводить эффективный коэффициент, исходя из соотношения $Y_{\text{эфф}} = \Delta d \times N/D$, где Δd – радиационная усадка материала, N – его атомная плотность, D – доза облучения. Величина Δd должна определяться из экспериментов с применением методов прецизионной профилометрии, лазерной или спектральной эллипсометрии. При моделировании распыления кластерными ионами, используя известную модель «кулоновского взрыва» [17], можно оценить энергию каждого из составляющих кластер атома и далее использовать описанную методику.

Таким образом, перед проведением ВИМС-анализа, особенно в статическом режиме, необходимо оценить эффективность каскадного перемешивания и, исходя из возможностей экспериментальной установки (тип ионов, энергия, угол падения и др.), выбрать оптимальный режим его проведения. Программа SRIM-2003.24, дополненная описанными подпрограммами, позволяет существенно упростить эту процедуру.

Автор выражает благодарность Фонду фундаментальных исследований Республики Беларусь за частичную финансовую поддержку проведенных исследований (проект T03-185).

1. Распыление под действием бомбардировки частицами / Под ред. Р. Бериша и К. Витмака. М., 1998. Вып. 3. С. 237.

2. Взаимодействие заряженных частиц с твердым телом / Под ред. А. Грас-Марти. М., 1994.

3. Иванов А. И., Леонтьев А. В. // ВИП-2001: Материалы междунар. конф.: В 2 т. Звенигород, 2001. Т. 1. С. 354.

4. Brinkhuis R.H.G., van Ooij W.J. // Surf. Interf. Analysis. 1988. Vol. 11. P. 214.

5. Алиев А. А., Хазратов Ф. // ВИП-2001: Материалы междунар. конф.: В 2 т. Звенигород, 2001. Т. 1. С. 331.

6. Stapel D., Thieman M., Hagenhof, Benninghoven A. Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS XII) / Eds. A.A. Benninghoven, P. Bertrand, H.N. Migeon and H.W. Werner. Amsterdam, 2000. P. 21.

7. Benninghoven A., Stapel D., Brox O. et al. // Ibid. P. 25.

8. Napolitani E., Carnera A., Storti R. et al. // J. Vac. Sci. and Technol. (B). 2000. Vol. 18. № 1. P. 519.
9. Downey D.F., Osburn C.M., Cummings J.J. et al. // Thin Solid Films. 1997. Vol. 308/309. P. 562.
10. Takeuchi D., Shimada N., Matsuo J., Yamada I. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 1997. B121. P. 345.
11. Van Heide P.A.W., Lim M.S., Perry S.S., Bennet J. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 2003. B201. № 2. P. 413.
12. Deng Z.W., Souda R. // Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. 2001. B183. № 3-4. P. 260.
13. Пустовит А.Н. // ВИП-2003: Материалы междунар. конф.: В 2 т. Звенигород, 2003. Т. 1. С. 397.
14. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М., 1989.
15. Иванов А.И., Леонтьев А.В. // ВИП-2003: Материалы междунар. конф.: В 2 т. Звенигород, 2003. Т. 2. С. 288.
16. Иванов А.И., Леонтьев А.В. // Поверхность: Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2004. № 5. С. 48.
17. Susuki Y., Mukai H., Kimura K., Mannami M. // Nucl. Instr. Meth. 1990. Vol. B48. P. 347.

Поступила в редакцию 10.06.2004.

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

УДК 621.382.537.33:621.317

А.Д. АНДРЕЕВ, А.А. ВАЛИЕВ, О.Г. ЖЕВНЯК, С.Г. МУЛЯРЧИК, И.М. ШЕВКУН

АППРОКСИМАЦИЯ ВАХ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОГО N-КАНАЛЬНОГО МОП-ТРАНЗИСТОРА

The approximation of the high-dopant MOSFETs current-voltage characteristic before saturation is offered. This method allows to calculate drain current in the case when there is discrepancy of a drain current saturation voltage and effective gate voltage. It is shown that account of the drain voltage dependence of mobility near drain is not necessary. That approximation substrate doped profile near surface silicon and of the inversion layer localization account of the doped level substrate dependence of channel length is necessary for calculation source and drain depletion layers meet.

При проектировании МОП-транзисторов (МОП-ПТ) масштабное уменьшение размеров и приложенных напряжений приводит к необходимости соответствующего увеличения уровня легирования подложки. При этом возрастает крутизна начального участка вольт-амперной характеристики (ВАХ) прибора и переход к насыщению тока стока осуществляется при стоковых напряжениях, сравнимых или меньших, чем удвоенный потенциал нейтрального объема подложки транзистора. Проводящий канал остается не перекрытым по всей его длине от истока до стока, т. е. инверсионный заряд вблизи стокового перехода полностью не подавляется [1, 2]. Нами получены формулы, позволяющие рассчитать ток в канале транзистора при изменении стокового напряжения от нуля до выхода в насыщение. Его максимальная расчетная величина сравнивается с экспериментальным значением, что позволяет определить влияние приложенных напряжений на подвижность электронов вблизи стокового перехода. Для последней проводится сравнение и с результатами кинетического моделирования. Дается качественная оценка влияния сегрегации примесей на соотношение между длиной канала и концентрацией примесных атомов в области формирования инверсионного слоя.