

Разработка жестких полировальных материалов для применения в микроэлектронике Development of rigid polishing materials for use in microelectronics

Д.И. ТЕРАШКЕВИЧ, Е.С. БОКОВА, Н.В. ЕВСЮКОВА

D.I. TERASHKEVICH, E.S. BOKOVA, N.V. EVSUKOVA

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство),
Москва, Россия
A.N. Kosygin Russian State University (Technology. Design. Art),
Moscow, Russia

evsyukova-nv@rguk.ru

В работе приведены результаты разработки условий получения жестких полировальных материалов на основе растворов полиэфируретанов для химико-механической планаризации полупроводниковых кремниевых пластин.

Ключевые слова: микроэлектроника, полировальный материал, химико-механическая планаризация, пористая структура, твердость, модуль упругости

The paper presents the results of development of conditions for obtaining hard polishing materials based on polyetherurethane solutions for chemical-mechanical planarization of semiconductor silicon wafers.

Keywords: microelectronics, polishing material, chemical-mechanical planarization, porous structure, hardness, modulus of elasticity

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-02-39-44

Пористые полимерные материалы на основе полиуретанов, как эластичные, так и жесткие, нашли широкое применение в микроэлектронике. Для улучшения качества полупроводниковых пластин применяют различные методы, позволяющие минимизировать разницу в высотах между низшими и высшими точками рельефа, в идеале до формирования абсолютно плоской поверхности. Одним из таких методов является химико-механическая планаризация (ХМП), представляющая собой одновременно химическое воздействие и абразивное истирание в результате контакта между полируемой пластиной, полировальным материалом и абразивной суспензией, предназначенной для растворения слоя диэлектрика на полируемой пластине. Полировальные материалы относятся к дорогостоящим расходным материалам, применение которых значительно увеличивает стоимость самих электронных чипов, поэтому во всем мире остро стоит вопрос об увеличении срока службы подобных материалов [1–5].

Особый интерес для потребителей представляют полировальные материалы семейства IC1010 и IC1000 – жесткие диски с ячеистой пористой структурой закрытого типа, производимые компанией Dow (США). Эти диски, как и основная масса полировальных материалов для производства интегральных схем, в настоящее время производятся в США и Японии такими компаниями, как Rohm and Haas (США) и Cabot (США), Nitta Haas (Япония), что в свете современных событий делает невозможным их прямое приобретение.

В связи с этим возникает необходимость проведения исследований по разработке и внедрению отечественных аналогов полировальных материалов для планаризации полупроводниковых пластин.

Цель работы – разработка условий получения жестких полировальных материалов на основе растворов полиэфируретанов для химико-механической планаризации полупроводниковых кремниевых пластин.

Объекты исследования

За прототипы при разработке жестких полировальных материалов для процесса ХМП были взяты образцы IC 1000™ и IC 1010™ (производства Dow, США), а также аналог IC 1000 – Rohm and Haas IC1000 (производства Китай).

Все материалы представляют собой микропористые листы с замкнутыми порами и практически монолитным межпоровым пространством.

Все они имеют практически одинаковую твердость 62–65D, но разный рабочий ресурс: IC 1010™ > IC 1000™ > аналог IC 1000™. При этом материалы отличаются размером пор в поверхностном рабочем слое: IC 1010™ (70–100 мкм) > IC 1000™ (40–75 мкм) > аналог IC 1000™ (9–42 мкм).

В качестве исходных образцов для вспенивания использовали готовые листы на основе термопластичных полиуретанов промышленного производства марки «Витур ТМ–0533–90» – твердость по Шору 50 D и «Витур ТМ–0333–95» – твердость 69 D (производство ООО НПФ «Витур», г. Владимир), изготовленных на основе ТУ 6-05-221-526-82 распространяемых на полиуретан термопластичный типа Витур Т и листы на его основе. Толщина пластин составляла $1,5 \pm 0,5$ мм.

Методы исследования

Для установления зависимости между структурными и физико-механическими параметрами полировальных материалов и показателями их эффективного применения в процессе ХМП в работе был применен метод твердотельного вспенивания, подробно описанный в работах [6, 7].

Порообразование методом твердотельного вспенивания проводили на специально созданной установке в сосуде высокого давления ($P = (2 \div 5) \pm 0,01$ МПа) в диапазоне температур от 80 до 160°C в лабораторных условиях (рис. 1).

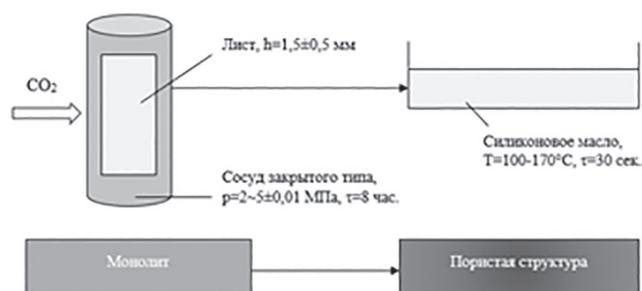


Рис. 1. Схема процесса твердотельного вспенивания.

В процессе твердотельного вспенивания в сосуде поддерживали заданную температуру и подавали в него углекислый газ определенной концентрации. Время насыщения образца ($t_{\text{нас}}$, час) составляло в среднем 8 часов. После этого давление быстро сбрасывали (примерно за 2 минуты), и образец, насыщенный газом, помещали в ванну с горячим силиконовым маслом, температура которого (температура вспенивания, $T_{\text{вс}}$, °C) была выше температуры стеклования полимера ($T_{\text{ст}}$), но ниже температуры его плавления ($T_{\text{пл}}$).

Время выдержки образцов в ванне, необходимое для полного вспенивания, составляло от 30 до 90 с, в зависимости от начальной твердости пластин. Вспененные образцы тщательно промывали спиртом для удаления остатков масла и сушили в вакууме для последующих исследований.

Пределы равновесной концентрации газа ($C_{\text{газ}}$, %) и температуры вспенивания определялись изначальной твердостью полимера. Пластина на основе «Витур ТМ-0533-90» при заданном давлении газонасыщения ($P_{\text{нас}}$, МПа) поглощала больше газа по сравнению с пластиной на основе «Витур ТМ-0333-95». Кроме того, в случае пластин на основе «Витур ТМ-0533-90» необходимо было поддерживать более низкую температуру вспенивания ($T_{\text{вс}}$, °C).

Химико-механическую планаризацию проводили на лабораторной установке с двумя полировальными столами и одной сменной полировальной головкой, обеспечивающей обработку пластин диаметром 50–150 мм по бесприклеочной технологии с возможностью приложения обратного давления (конструкция полировального модуля установки аналогична установке Speed-Fam Auriga). Скорость потока суспензии составляла 100 мл/мин. Кондиционер представлял собой алмазный диск Abrasive Technologies Infinity.

Удельное давление на полируемую пластину составляло 28 г/см², скорость вращения полировального стола – 93 об/мин, скорость вращения полировальной головки – 87 об/мин.

Определение твердости по Шору проводили в соответствии с ГОСТ 24621-2015 (ISO 868:2003), применяя шкалу тип А для мягких материалов, и тип D – для твердых.

Определение модуля упругости материалов при сжатии проводили на универсальной машине для испытания материалов Instron 4411 Tensile.

Для определения размера пор использовали сканирующий электронный микроскоп (SEM) марки Tescan VEGA 3 SBH, снабженный электронной пушкой и вольфрамовым нагреваемым катодом с термоэлектронной эмиссией и возможным увеличением от 4,5 до 1 000 000. За размер пор принимали среднее значение, определенное по изображениям поперечного сечения образцов.

Пористость материалов определяли пикнометрическим методом, используя принцип плавучести Архимеда для измерения плотности. В качестве пикнометрической жидкости использовали чистый этанол, смачивающий поверхность материалов. Образцы выдерживали в спирте при $T = 20 \pm 50^\circ\text{C}$ в течение 72 часов до изменения плотности, которая у пористых образцов имела тенденцию к увеличению во времени.

Таблица 1. Параметры ТМВ и структурные показатели полученных пенополиуретанов*.

№	$P_{\text{нас}}$, МПа	$T_{\text{вс}}$, °C	ρ , г/см ³	P , %	Средний размер пор, мкм	Твердость по Шору, А	$C_{\text{газ}}$, %	Модуль упругости при сжатии, МПа
Твердость исходных пластин 50 по Шору D								
1	3,02	137	0,551	48	40	70	5,5	10
2	6,50	110	0,716	44	5	60	4,0	12
3	5,00	85	1,062	12	6	81	–	27
4	5,51	96	0,809	27	5	75	–	21
5	6,20	113	0,649	45	6	60	–	12
Твердость исходных пластин 69 по Шору D								
6	3,5	145	0,840	30	8	85	1,5	330
7	5,00	145	0,812	30	6	88	3,1	320
8	2,55	150	1,013	15	50	91	2,0	530
9	2,41	160	1,015	14	100	87	2,0	520
10	2,07	171	0,6962	40	47	90	2,3	260
11	5,00	113	0,9697	17	3	95	1,4	–

* Показатели свойств указаны для образцов с удаленным внешним слоем

Экспериментальная часть

Варьируя температуру и давление насыщения образцов газом, получали пористые материалы с широким диапазоном размеров пор от 3 до 100 мкм и пористостью от 10 до 48% (табл. 1).

На рис. 2 представлены наиболее типичные микрофотографии поперечного сечения полировальных материалов, полученных в лабораторных условиях методом твердотельного вспенивания.

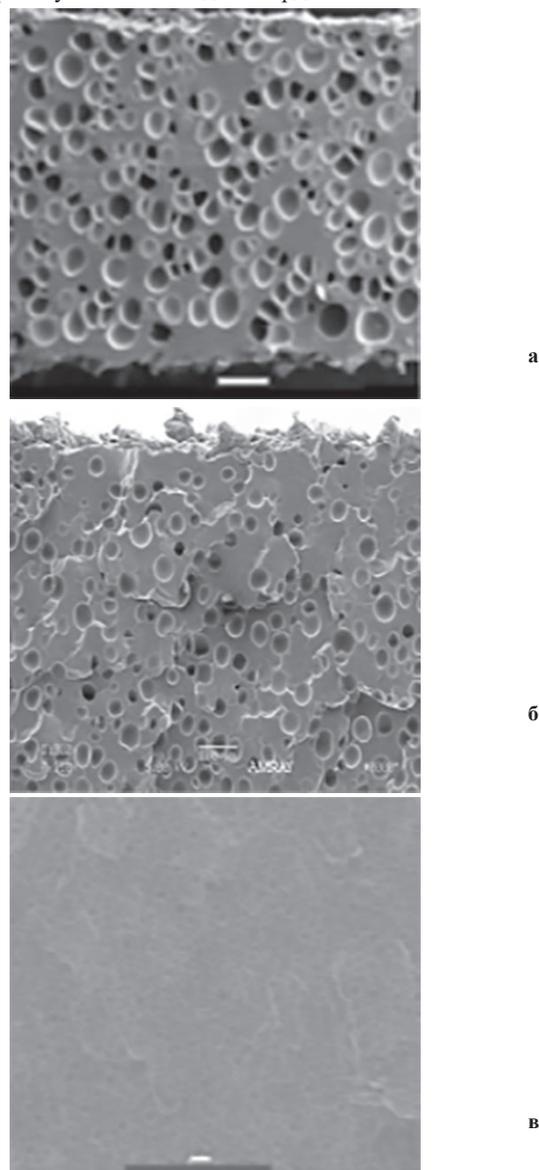


Рис. 2. СЭМ-изображения поперечных сечений полировальных материалов со среднечисленными размерами пор: а – 100 мкм (образец №9); б – 50 мкм (образец №8); в – 3 мкм (образец №11).

Как видно из микрофотографий, полировальные материалы характеризуются равномерной закрытой пористостью и практически одинаковыми по размеру порами.

Все полученные образцы перед испытанием в процессе ХМП были обработаны алмазным кондиционером для удаления поверхностного слоя и вскрытия пор. Таким образом, можно считать, что размер пор или структура пор были однородными в течение всего цикла полировки при условии периодического кондиционирования.

Как видно из данных таблицы 1, давление в сосуде и температура вспенивания оказывают существенное влияние на характеристики получаемых материалов.

Согласно закону Генри, для ТПУ определенной твердости растворимость CO₂ возрастает с увеличением давления [8]. Например, если сравнить два образца (№6 и №7) одинаковой исходной твердости, полученные при разном давлении насыщения 3,5 и 5 МПа, но при одинаковой температуре T = 145°C, то концентрация газа во втором будет практически в два раза больше (3,1%), чем в первом (1,5%).

Влияние температуры вспенивания на морфологию образцов при прочих равных условиях можно проследить на образцах №8 и №9. При одинаковой концентрации газа (2%) более высокое значение температуры вспенивания для образца №9 приводит к увеличению размера пор почти в два раза, при этом общая пористость материалов практически одинаковая и составляет 14–15%.

Для эксперимента представляли интерес образцы с одинаковым размером пор, но разной пористостью, или с одинаковой пористостью, но разным размером пор, как в линейке пластин как с одинаковой начальной твердостью, так и с различной.

На первом этапе исследований была поставлена задача проанализировать влияние твердости исходных полиуретановых пластин на параметры процесса ХМП. Для этого были выбраны полировальные материалы с одинаковым средним размером пор 5–6 мкм и близкой пористостью 27–30% (образцы №4 и №7), полученные из полиуретановых пластин разной твердости (50 D и 69 D).

На все полировальные материалы наносили концентрические канавки, способствующие равномерному распределению полирующей суспензии по площади полируемой пластины и полировального материала, со следующими размерами: ширина 508±0,5 мкм, шаг канавки 3048±0,5 мкм, глубина 318±0,5 мкм. Подобную морфологию канавок имеют большинство промышленных полировальных материалов [9]. Образцы полировальных материалов твердостью 50 D имели взаимно перпендикулярные канавки (ширина – 711 мкм, шаг – 6350 мкм).

На рис. 3 приведены результаты влияния твердости полировальных материалов, имеющих одинаковую пористость и размер пор, на профили скорости удаления межслойного диэлектрика в процессе ХМП.

Для обоих протестированных полировальных материалов профили смена слоя диэлектрика (тетраэтоксилана (TEOS)) с полируемой пластины являются плоскими по всей площади, за исключением участка в 1 см от края.

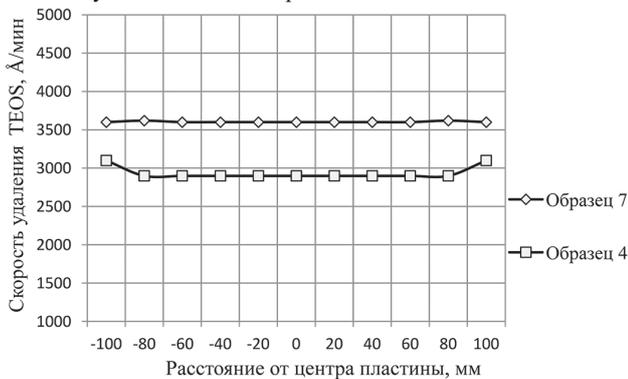


Рис. 3. Влияние исходной плотности материала на профили скорости удаления TEOS с полируемой пластины при одинаковой пористости и размере пор полировальных материалов: образец №4 – 50 D; образец №7 – 69 D (средние показатели трех пластин).

В случае пористых материалов твердость образцов зависит от твердости полимера, которая, в свою очередь, определяется

соотношением жестких и мягких сегментов в структуре полиуретана, а также характером пористой структуры. Теоретически очевидно, что уменьшение твердости исходного полимера с одновременным снижением плотности за счет увеличения пористости полировального материала, полученного на его основе, должны привести к снижению твердости последнего. Однако не ясно, какой из факторов в большей степени влияет на конечную твердость: твердость полиуретана как исходного сырья или пористость полученного на его основе материала. В работе [10] показано, что твердость и модуль упругости такого рода материалов зависят не только от химической природы полимера, но и от их относительной плотности, которую рассчитывали по уравнению:

$$\rho_{от} = \frac{\rho_{п}}{\rho_{м}}, \quad (1)$$

где $\rho_{п}$ – плотность вспененного материала, $\rho_{м}$ – плотность твердого (монокристаллического) образца.

Простейшая математическая модель для материалов с закрытыми порами Гибсона и Эшби [5, 11] использовалась для описания деформации пористых пен до вскрытия пор:

$$\frac{E_{п}}{E_{м}} = k \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{м}} \right)^n, \quad (2)$$

где $E_{п}$ и $E_{м}$ – модуль упругости вспененного и монокристаллического образца соответственно, $\rho_{п}$ – плотность вспененного материала, $\rho_{м}$ – плотность твердого (монокристаллического) образца. Константы k и n зависят от структуры пены (пены с открытыми или закрытыми ячейками).

Если пены обладают закрытыми порами, то, согласно (2), приведенный (относительный) модуль упругости пропорционален квадрату приведенной (относительной) плотности [11].

На рис. 4а приведен график зависимости модуля упругости от пористости. На рис. 4б – график зависимости приведенного модуля упругости материала от квадрата приведенной плотности.

Пористость рассчитывали по формуле:

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_{п}}{\rho_{м}} \right) \cdot 100\% \quad (3)$$

Относительный модуль упругости рассчитывали согласно (2).

Значения плотности, модуля упругости и твердости для монокристаллических пластин приведены в таблице 2, показатели пористых – в таблице 1.

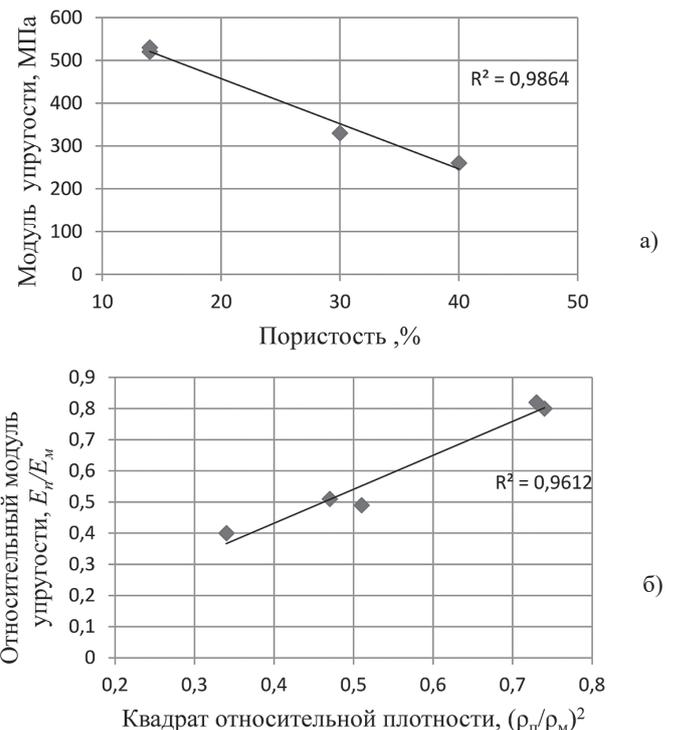


Рис. 4. а – Модуль упругости полировальных материалов твердостью 69 D (образцы 6–10) в зависимости от пористости; б – Относительный модуль упругости полировальных материалов в зависимости от квадрата относительной плотности.

Таблица 2. Показатели монолитных полиуретановых пластин с твердостью 69 D.

Твердость по Shore D	Плотность, ρ_M , г/см ³	T_{CT} , °C	$T_{пл}$, °C	$T_{кр}$, °C	Модуль упругости при сжатии, МПа
69	1,18	50	185	108	650

На рис. 5а и 5б приведены аналогичные зависимости для показателя твердости. Данные получены для полиуретановых пластин плотностью 69 D.

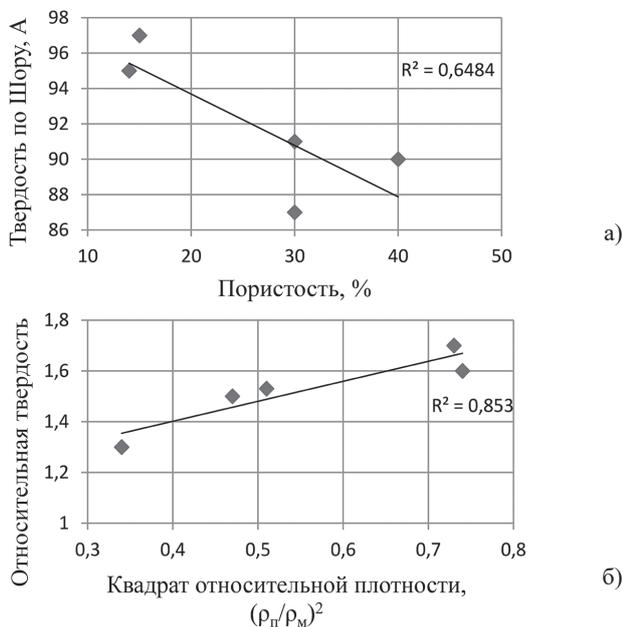


Рис. 5. а – Твердость полировальных материалов с твердостью 69 D (образцы 6–10) в зависимости от пористости; б – Относительная твердость полировальных материалов в зависимости от квадрата относительной плотности.

Видно, что модуль упругости и твердость уменьшаются пропорционально плотности. При этом, согласно рисунку 4б, существует сильная корреляция между модулем упругости и квадратом относительной плотности ($R^2 = 0,96$). Это указывает на то, что модуль упругости микропористых полиуретанов может быть рассчитан по модели Гибсона–Эшби.

Анализируя рис. 5б, где представлена относительная твердость как функция квадрата относительной плотности, очевидно, что здесь нет сильной корреляции, при этом также имеет место линейное снижение твердости с уменьшением квадрата относительной плотности.

В целом результаты, приведенные на рис. 4 и 5, показывают, что в случае микропористых материалов на основе полиуретанов как модуль упругости, так и твердость уменьшаются линейно с увеличением пористости или квадрата относительной плотности.

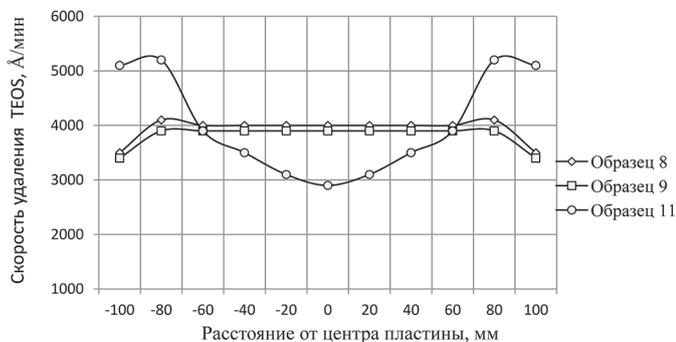


Рис. 6. Влияние размера пор полировальных материалов на профили скорости съема тетраэтоксилана с полируемой пластины. образец №11: пористость 16%, размер пор 3 мкм; образец №8: пористость 15%, размер пор 50 мкм; образец №9: пористость 14%, размер пор 100 мкм. Исходная твердость всех полиуретановых пластин 69 D.

Далее в работе исследовали полировальные материалы с близкой пористостью 14–18%, но с различными размерами пор: 3, 50 и

100 мкм (образцы 11, 8 и 9 соответственно), полученные из полиуретановых пластин твердостью 69 D.

Профили скорости удаления TEOS для полировальных материалов с разным диаметром пор приведены на рис. 6.

Для материалов с размерами пор 50 и 100 мкм (образцы 8 и 9, соответственно) профили скорости полировки являются плоскими по всей пластине, за исключением участка в 1 см от края. Для образца 11 имеет место неоднородный профиль удаления материала. Скорость полировки на краю пластины намного выше, чем в центре.

Далее в работе были исследованы материалы, изготовленные из пластин твердостью 69 D, имеющие близкий средний размер пор 47–50 мкм, но обладающие разной пористостью 40 и 15% (образцы № 8 и №10).

Из рис. 7 видно, что имеет место лишь 2,5%-ное увеличение скорости удаления диэлектрика с полируемой пластины при увеличении пористости полировального материала.

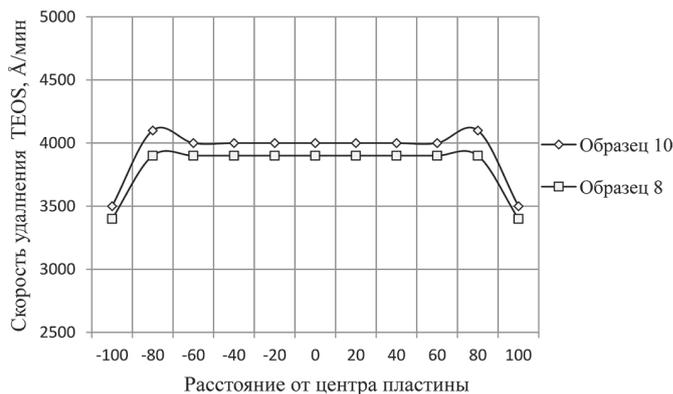


Рис. 7. Влияние пористости полировального материала на скорость удаления диэлектрика: образец №8, пористость 15%; образец №10, пористость 40%.

Вероятнее всего, столь незначительное повышение скорости съема при существенном увеличении пористости связано с практически одинаковым размером пор полировальных материалов.

На рис. 8 приведены профили скорости удаления межслойного диэлектрика в зависимости от пористости материала. Видно, что профили полировки практически одинаковы.

На рис. 9 показаны профили скорости удаления межслойного диэлектрика для экспериментальных материалов и промышленного образца IC 1010™ (пористость 14–30%), отличающихся твердостью и размером пор, но имеющих практически одинаковую пористость (образцы №3 и №9).

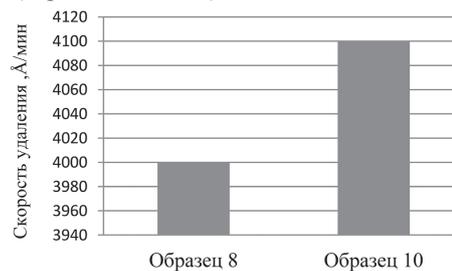


Рис. 8. Влияние пористости полировального материала на профиль скорости съема с полируемой пластины тетраэтоксилана: образец №8 – пористость 15%; образец №10 – пористость 40%.

Видно, что материалы с разной твердостью, но с малым размером пор (3 и 6 мкм) демонстрируют значительную неравномерность профиля скорости удаления межслойного диэлектрика. Материал с твердостью исходных пластин 69 D и большим размером пор, порядка 100 мкм, обеспечивает плоский профиль полировки, аналогичный серийному материалу IC 1010™. Таким образом, очевидно, что изменение твердости полимера также не влияет на профили скорости полировки межслойного диэлектрика, если размеры пор малы.

В целом, все приведенные в данном разделе зависимости позволяют исключить влияние на неравномерность профилей скорости удаления межслойного диэлектрика таких характеристик полировального материала, как твердость полимера и пористость полировального материала.

При проведении эксперимента было выявлено, что применение полировальных материалов с малым размером пор (2–6 мкм) очень часто приводило к расслоению слоя диэлектрика на полируемой пластине оксида кремния, что может свидетельствовать о недостатке суспензии в зоне полировки.

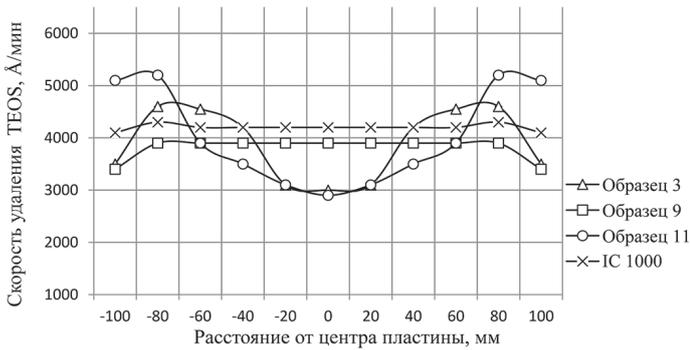


Рис. 9. Профили скорости полировки межслойного диэлектрика: образец №3 – твердость полимера 50 D, пористость 12%, размер пор 6 мкм; образец №9 – твердость полимера 69 D, пористость 14%, размер пор 100 мкм; образец №11 – твердость полимера 69 D, пористость 16%, размер пор 3 мкм; образец IC 1010™ – твердость 100 D, пористость 10%, размер пор 100 мкм.

Поры поверхностного слоя полировального материала служат своеобразными резервуарами для исключения явления «голодания» суспензией в процессе полирования.

Предположим, что все поры имеют одинаковый размер с радиусом r ; все поры случайно и гомогенно распределены в полимерной матрице, и только те поры, которые открыты на поверхности, могут удерживать суспензию, их удерживающая способность на единицу площади поверхности, V , равна

$$V = r \cdot P, \tag{5}$$

где P – пористость, r – радиус поры.

В таблице 3 показано влияние размера пор и пористости полировальных материалов на их способность удерживать суспензию, а также приведены данные о емкости концентрических канавок.

Видно, что при постоянной пористости уменьшение размера пор снижает способность удерживать суспензию, что эквивалентно меньшему ее содержанию в углублениях и приводит к снижению скорости полирования пластин. При этом для полировального материала с порами 100 мкм и пористостью 50% фактическая емкость для удерживания суспензии на единицу площади поверхности может достигать 1/3 расчетной удерживающей способности концентрических канавок.

Таблица 3. Расчет удерживающей способности на единицу площади для материалов с разной пористостью и размером пор.

№	Размер пор, мкм	Пористость, %	Удерживающая способность, мкм ³ / мкм ³
1	0,5	10	0,025
2	5	15	0,25
3	50	15	2,5
4	100	50	25,0
5	Концентрические канавки (CC) шириной 508, шагом 3048 и глубиной канавки 381 мкм		76,29 [9]

Таким образом, может быть предложен следующий механизм работы материалов в зависимости от размера пор (рис. 10).

Небольшие поры в полировальном материале приводят к высокому адгезионному трению, что может привести к высокой скорости удаления межслойного диэлектрика вблизи кромки пластины. Однако высокая адгезия предотвращает поступление свежей суспензии в центр пластины, что приводит к ее недостатку. Таким образом, «сухой» полировальный материал под пластиной с межслойным диэлектриком, вызывает очень большое трение между ними. Параллельно с этим суспензия доставляется преимущественно на края пластины и в сочетании с высокой силой трения обеспечивает высокую скорость удаления именно по краям.

Известно, что для кондиционирования полировальных материалов в процессе ХМП применяют диски с зернистостью от 50 до 500 мкм. При малом размере пор полировального материала (меньше 20 мкм) зерна кондиционера не могут погружаться в поры и разрывать их края. В конечном счете, это приводит к пилингу полировального материала и снижению скорости полировки.

Выводы

Таким образом, в работе методом твердотельного вспенивания готовых монолитных полиуретановых пластин с различной твердостью (50 и 69 D), путем варьирования технологических параметров вспенивания (давление газа, температура, время) получена серия полировальных материалов с разным размером пор от 3 до более 100 мкм и пористостью от 12 до 48%.

Образцы, полученные данным методом, позволили с высокой степенью результативности установить и разграничить степень влияния на эффективность процесса ХМП таких параметров, как пористость, размер пор и твердость полиуретана.

Установлено, что полировальные материалы из полиуретанов с меньшей твердостью (50 D), обеспечивают низкую дефектность обрабатываемой поверхности. Увеличение скорости удаления межслойного диэлектрика наблюдается с увеличением пористости для материалов с одинаковым размером пор на основе полиуретанов с аналогичной твердостью исходных пластин, даже если модуль упругости с увеличением пористости уменьшается.

В исследованном диапазоне размеров пор в образцах показано, что размер пор оказывает значительное влияние на профиль полировки. Полировальные материалы с более крупными порами обеспечивают получение равномерного профиля в отличие от материалов, поры которых менее 20 мкм.

Установлено, что неравномерные профили скорости полировки характерны для материалов с небольшими порами, независимо от других характеристик полировального материала, таких как твердость полимера, пористость и морфология пор, а также технологических параметров процесса ХМП.

Предложен механизм «работы» полировального материала в зависимости от размера пор, учитывающий их удерживающую способность для удержания суспензии, силу сцепления, создаваемую порами на поверхности материала, а также взаимосвязь размера пор с размером зерен алмазного кондиционера.

Литература

1. Zantye P.B., Kumar A., Sikder A.K. Chemical mechanical planarization for microelectronic applications // Mater. Sci. Eng. Rep. 45, 89, FL, USA (2004).
2. A. Prasad, G. Fotou, and S. Li. The effect of polymer hardness, pore size, and porosity on the performance of thermoplastic polyurethane-based chemical mechanical polishing pads. Cabot Microelectronics Corporation (2013).

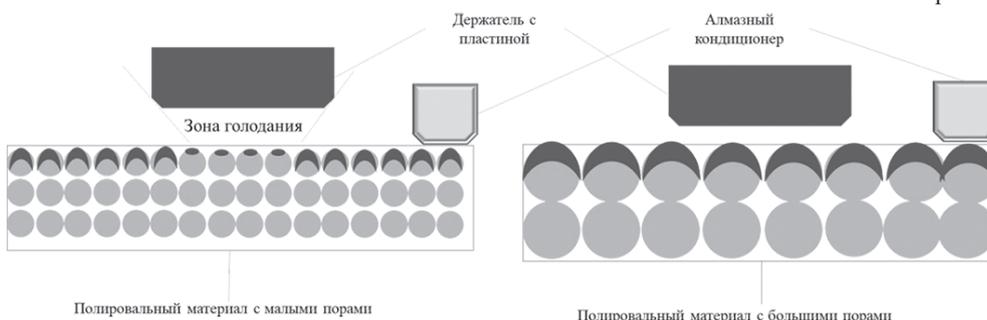


Рис. 10. Механизм «работы» полировального материала в зависимости от размера пор.

3. Shin Hwa Li, Robert O. Miller, Chemical Mechanical Polishing in Silicon Processing, Volume 63 Semiconductors and Semimetals Vol 63, Academic Press / Lee M. Cook, Consumables 11: Pad, pp. 155–157 (307), San Diego, CA 92101-4495, USA (2000).
 4. Oliver M R. Chemical-Mechanical Planarization of Semiconductor Materials. Berlin (Germany): Springer Series in Materials Science (SSMATERIALS, Vol. 69), 2004. – 428 p.
 5. Гольдштейн Р.В. Химико-механическое полирование. Модели процесса / Р.В. Гольдштейн, Н.М. Осипенко. – Москва: Институт проблем механики Российской академии наук, 2009. – 40 с.
 6. Prasad A., Fotou G., Li S. The Effect of Polymer Hardness, Pore Size and Porosity on the Performance of Thermoplastic Polyurethane-Based Chemical Mechanical Polishing Pads. – Journal of Materials Research. 2013. – Vol. 28, №17. – pp. 2380–2393.
 7. Пат. 8080194 (США). Methods and pressure vessels for solid-state microcellular processing of thermoplastic rolls or sheets, заявители Nadella K., Powers S., Malone T. 2011.
 8. Еремин В.В., Каргов С.И., Успенская И.А., Кузьменко Н.Е., Лунин В.В.. Основы физической химии, учебник в 2-х частях 5-е изд., перераб. и доп. М.: Лаборатория знаний, 2019. – 348 с.
 9. Choi J. G., Prasad Y. N., Kim I. K., Kim W. J., Park J. G. The synergistic role of pores and grooves of the pad on the scratch formation during STI CMP. J Electrochem Soc. 2010. Vol. 157, №8, pp. 806–809.
 10. L.G. Gibson and M.F. Ashby: Cellular Solids: Structure and Properties, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999).
 11. A.P. Roberts and E.J. Garboczi: Elastic properties of model random three-dimensional open cell solid. J. Mater. Phys. Solids, 50, 33(2002).
-
-