

УДК 621.396.6:621.315.6

ПЛАНАРИЗАЦИЯ ПОДЛОЖЕК ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ

Тюлькова Анастасия Александровна⁽¹⁾, Кузовков Алексей Валерьевич⁽²⁾,
Юлия Сергеевна Боброва⁽³⁾

*Студент 3 курса⁽¹⁾, студент 3 курса⁽²⁾, аспирант (2 год)⁽³⁾
Кафедра «Электронные технологии в машиностроении»,
Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана*

*Научный руководитель: Ю.С. Боброва,
Ассистент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»*

Современные радиоэлектронные устройства, предназначенные для радиолокации, передачи данных, измерения расстояний по скорости и времени прохождения радиоволн и т.п., требуют рассеивания значительных тепловых мощностей. Плотность рассеиваемой мощности интегральных схем (далее – ИС) в таких устройствах может достигать 100 Вт/см². Для её эффективного отвода от ИС следует использовать металлокерамические подложки на основе нитрида алюминия (далее – AlN), который имеет ряд преимуществ перед другими керамическими материалами:

- AlN обладает высокой, сопоставимой с алюминием, теплопроводностью – от 160 до 200 Вт·м⁻¹·К⁻¹;
- Коэффициент температурного расширения (далее – КТР) у AlN согласован с КТР полупроводниковых материалов подложек ИС (кремния, арсенида и нитрида галлия) – $6,2 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ при 100–500°C;
- AlN характеризуется высоким значением напряжением пробоя и электрической прочностью – до 15 кВ/мм;
- Прочность AlN на изгиб – до 240 МПа.

Таким образом, совокупность высоких тепло- и электрофизических характеристик металлокерамики из AlN, а также возможность её эксплуатации при сохранении работоспособности в широком температурном диапазоне, позволяют сделать вывод о целесообразности её использования в качестве материала основания теплонагруженных микрокоммутационных коммутационных плат (далее – МКП), изготавливаемых по тонкоплёночной технологии.

Однако, в отличие от используемой до сих пор алюмооксидной керамики (далее – Al₂O₃), чистота поверхности которой после полирования достигает 13-14 класса (рис. 1, Rz до 0,032 мкм), бюджетные заготовки из AlN имеют класс чистоты поверхности не выше 8 (Rz до 2,5 мкм) и требуют дополнительно комплекса мер по улучшению качества поверхности (рис. 2).

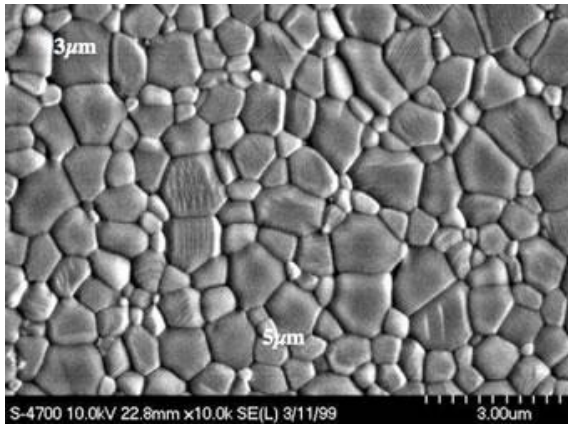


Рис. 1. Поверхность подложки Al₂O₃ класса чистоты 13 (изображение получено при помощи электронного-сканирующего микроскопа)

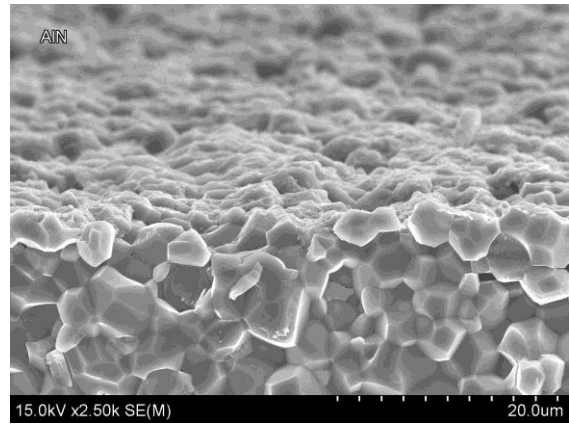


Рис. 2. Поверхность и срез подложки AlN класса чистоты 8 (изображение получено при помощи электронного-сканирующего микроскопа)

Механическая планаризация поверхности бюджетных заготовок AlN приводит к тому, что зерна AlN выкрашиваются, имея силу сцепления между собой меньшую, чем та, что прикладывается во время тонкого шлифования. Размер зерен слишком велик (от 2,5 до 5 мкм), а взаимная диффузия между ними недостаточная (рис. 3), чтобы посредством механической планаризации можно было получить поверхность, удовлетворяющую требованиям тонкоплёночной технологии.

Обзор способов планаризации показал, что существует ряд методов, позволяющих снизить шероховатость металлокерамической подложки AlN за счёт нанесения различных выравнивающих покрытий, которые затем могут быть сошлифованы и отполированы так, что впадины между зернами AlN окажутся заполненными.

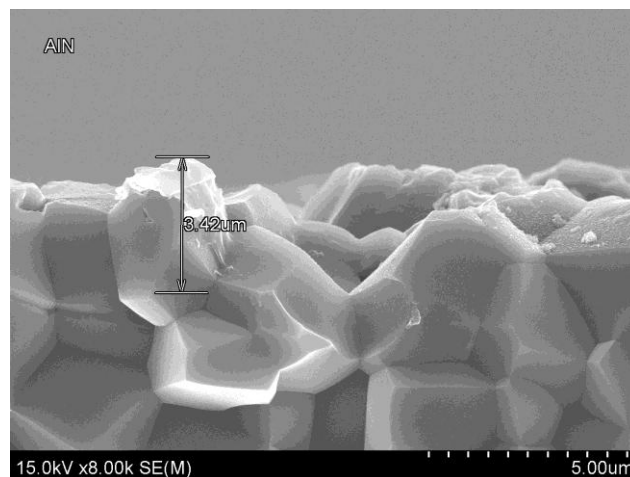


Рис. 3. Подложка AlN 8-го класса чистоты поверхности. Размер и форма зерен AlN (изображение получено при помощи электронного-сканирующего микроскопа)

В данной работе рассмотрены способы снижения шероховатости бюджетных подложек из AlN, посредством нанесения следующих планаризирующих покрытий:

- легкоплавкое стекло;
- «жидкое» стекло (SOG-материал);
- полимер SU-8.

Планаризация поверхности подложек из нитрида алюминия с помощью легкоплавких стекол

Для планаризации подложек AlN можно использовать легкоплавкие стекла, используемые для защиты p-n переходов в технологии производства ИС. Температура размягчения таких стекол 500–600°C, температура плавления 800–1100°C, что позволит подвергать подложки и наносимые на них функциональные слои отжигу при 400–500°C.

Возможные составы стекол [1]:

Состав 1. Для защиты кремниевых приборов используют порошкообразное стекло, состоящее из 50% окиси свинца, 40 % окиси кремния и 10% окиси алюминия, а для защиты германиевых приборов – 60% окиси свинца, 30% окиси кремния и 10% окиси алюминия. Состав приготавливают из суспензии в дистиллированной воде, наносят на поверхность кристалла и сплавляют при температуре 1000°C. Наносят стекло методами центрифугирования, седиментации суспензии или осаждения из паровой фазы.

Состав 2. Боратное стекло – более перспективное, так как отличается низкой электропроводностью и малыми диэлектрическими потерями, высокой механической прочностью, а также термической и климатической стойкостью. Боратное стекло имеет структуру, отличающуюся от структуры силикатных стёкол, и способно выдерживать умеренные концентрации катионов (например, натрий до 0,1%), не увеличивая электропроводимость. Боратное стекло отвечает требованиям герметизации полупроводниковых приборов: свободно от щелочных металлов, уплотняется (спаивается) при температуре до 800 °С, относительно инертно и водонепроницаемо, имеет регулируемые коэффициенты температурного расширения.

Боратные стёкла состоят из бората цинка, окиси цинка, окиси кадмия, окиси алюминия, окиси кремния. Кроме того, они могут включать окись бериллия и в небольших окись титана, циркония, ниобия, лантана, церия, скандия, гафния, галлия, индия и их смеси. Эти составы стойки к расстёкливанию в широком диапазоне температур и обладают полной смешиваемостью составных частей.

В качестве примера можно привести следующий состав стекла этого типа: 22–25 % окиси кремния, 32–38% бората цинка, 12–20% окиси алюминия, 15–30% окиси цинка. Такое стекло обладает коэффициентом температурного расширения, равным $38 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне температур от 20 до 200°C. Толщина плёнки стекла от 1 до 20 мкм.

КТР боратного стекла ($38 \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне 20–200°C) близок к КТР нитрида алюминия ($4,6 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ при 20–300°C), что является гарантией нормальной работы подложек с покрытием в диапазоне рабочих температур (20–100°C).

Наиболее благоприятные результаты по однородности защитных плёнок могут быть получены при использовании в качестве жидкого компонента жидкости, имеющей диэлектрическую постоянную в интервале от 6 до 12. В качестве примера можно рекомендовать смесь, состоящую из 10 см³ изопропилового спирта, 3 см³ вторичного бутилового спирта, 64 см³ третичного бутилового спирта, 23 см³ бензина, и имеющую диэлектрическую постоянную равную 10.

Сплавление стеклянных частиц с поверхностью планаризируемого материала происходит в течение 5-10 минут при температуре на 25–80°C выше температуры размягчения стекла. После сплавления на поверхности образуется однородная, свободная от пор, тонкая стеклянная плёнка.

Планаризация подложек нанесением слоя жидкого стекла

Применение жидких spin-on-glass (SOG) стёкол в качестве планаризирующих покрытий выглядит перспективным вариантом снижения шероховатости подложек в силу простоты технологического процесса.

Современный SOG-материал представляет собой раствор, состоящий из пяти компонентов [2]:

- тетраэтоксисилан – основа для формирования Si-O каркаса плёнки;
- бутанол – растворитель;
- пролипропиленгликоль – регулятор вязкости;
- триметилсилилфосфат – легирующая добавка, способствующая увеличению стойкости плёнки к растрескиванию при высоких температурах;
- раствор азотной кислоты в деионизованной воде – стабилизатор раствора.

Формирование SOG-слоя производится золь-гель методом и включает несколько этапов. Раствор наносят на подложку методом центрифугирования, что обеспечивает высокую однородность слоя по толщине. В зависимости от вязкости раствора и скорости вращения подложки можно получать плёнки толщиной 50–500 нм. Типичные значения скорости вращения подложки для данной операции составляют 1500–4000 об/мин, а длительность операции – 20–30 с. Далее нанесённый слой подвергается сушке при 150–200 °С и окончательной термообработке при 400–450 °С в течение 30 минут.

В процессе термообработки происходит усадка плёнки на 2–15%, приводящая к возникновению внутренних напряжений до 200 МПа, которые в свою очередь могут привести к растрескиванию полученного слоя. Для предотвращения данного эффекта в исходный раствор вводятся легирующие добавки.

По завершении технологического процесса на поверхности подложки формируется Si-O каркас (рис. 4). В случае наличия легирующей добавки в полученной структуре присутствуют включения фосфора (Рис. 5), при этом стойкость плёнки к растрескиванию возрастает за счёт появления двойных связей P=O.

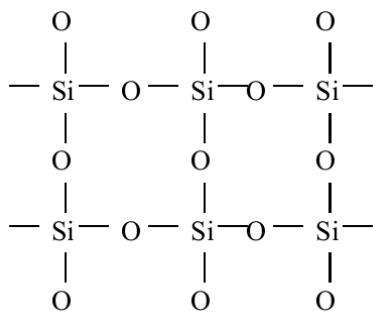


Рис. 4. Структура чистого SOG-слоя

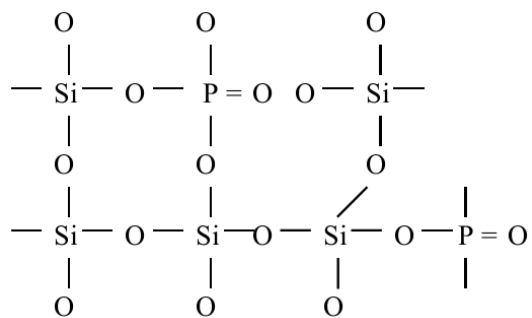


Рис. 5. Структура легированного SOG-слоя

В зависимости от количественного соотношения компонентов в исходном растворе, полученная плёнка может иметь различные электрические, механические и термические характеристики. Таким образом, относительная диэлектрическая проницаемость может меняться в диапазоне от 2.6 до 4.0, а коэффициент термического расширения – от $1 \cdot 10^{-6}$ до $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, что согласуется с КТР нитрида алюминия.

Планаризация поверхности плёнкой SOG позволяет достичь шероховатости $R_z = 0.05$ мкм (14-й класс чистоты), что показано в работе [3].

Совокупность представленных выше данных позволяет рассматривать SOG-материалы, как перспективное средство для снижения шероховатости поверхности подложек AlN с низким классом чистоты поверхности.

Планаризация поверхности подложек из нитрида алюминия с помощью фоторезиста SU-8

Планаризация подложек из AlN с помощью фоторезиста SU-8 теоретически возможна, поскольку SU-8 обладает свойствами, делающими его привлекательным для использования в качестве структурных и диэлектрических материалов и покрытий. Во-первых, из него на традиционном оборудовании за один технологический проход можно формировать слои толщиной 2–1000 мкм. Во-вторых, он обладает исключительной оптической прозрачностью, что делает возможным проведение четкой регулировки нанесения следующих слоев литографическим методом. В-третьих, конечная полимерная структура с большим количеством поперечных связей обладает высокой химической устойчивостью и хорошими температурными характеристиками, позволяющими выдерживать технологические процессы с температурами, превышающими 250 °С. И, наконец, SU-8 обладает отличными механическими свойствами. В таблице 1 приведены некоторые механические, физические и электрические свойства SU-8 [4].

Табл. 1. Основные свойства SU-8

| № п/п | Характеристика | Значение | Примечание |
|-------|---|-------------|---|
| 1 | Модуль упругости E, ГПа | 4,95 ± 0,42 | Процесс спекания при 200 °С, тест деформации балки |
| 2 | Коэффициент Пуассона | 0,22 | Процесс спекания при 95 °С |
| 3 | Температура стеклования T _g | ≈ 55 | Для пленки, не подвергавшейся облучению (без образования полимерных связей) |
| 4 | Температура стеклования T _g , °С | > 20 | Для полностью полимеризованной пленки (после процессов облучения и спекания при 200 °С) |
| 5 | Температура разрушения T _g , °С | ≈ 380 | Для полностью полимеризованной пленки (после процессов облучения и спекания при 200 °С) |
| 6 | Коэффициент теплового расширения, (P _{pm} (промилль) °С) ⁻¹ | 52,0 ± 5,1 | Процесс спекания при 95 °С |
| 7 | Теплопроводность, Вт×м ⁻¹ К ⁻¹ | 0,2 | Приведено значение типичное для всех полимеров SU-8 |
| 8 | Усадочная деформации | 0,075 | Процесс спекания при 95 °С |
| 9 | Относительная диэлектрическая проницаемость ε при 10 МГц | 3–4 | Процесс спекания при 100 °С |

КТР фоторезиста SU-8 больше КТР AlN ($52,0 \cdot 10^{-6} > 38 \cdot 10^{-7}$, 1/°С), что обеспечивает согласованную работу покрытия и подложки в диапазоне температур 20–100°С.

Были проведены эксперименты по планаризации подложек из AlN с помощью фоторезиста SU-8 с добавлением порошка SiO₂ с размерами частиц 25-90 нм в различных соотношениях. Выдвинулось предположение, что добавление порошка диоксида кремния увеличит твердость пленки фоторезиста.

Для проведения эксперимента были созданы 2 состава с различным объемным соотношением фоторезиста и частиц диоксида кремния:

- 1) SU-8: SiO₂ = 1:1
- 2) SU-8: SiO₂ = 5:1

Смеси были нанесены на подложки из AlN и высушены при последовательном нагреве при 70 и 100°C и проэкспонированы УФ-излучением в течение 120 с.

Заготовка с нанесенным покрытием из чистого SU-8 была высушена при последовательном нагреве при 70 и 100°C и проэкспонирована УФ-излучением в течение 360 с.

Были проведены измерения твердости полученных образцов на микротвердометре ПМТ-3М (табл. 2).

Табл. 2. Результаты измерения твердости планаризирующих покрытий на основе SU-8

| № опыта | 1 | 2 | 3 | Средняя твердость |
|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| SU-8:SiO ₂ = 1:1 | 116,246HV | 129,521HV | 119,366HV | 121,711HV |
| SU-8:SiO ₂ = 5:1 | 118,759HV | 107,585HV | 104,912HV | 110,418HV |
| SU-8 | 133,151HV | 133,151HV | 133,151HV | 133,151HV |

В проведенном эксперименте, твердость покрытий из смеси SU-8 и SiO₂ (1:1) незначительно меньше твердости покрытия из чистого SU-8. Это может быть объяснено тем, что время УФ-задубливания чистого фотополимера SU-8 было в 3 раза большим. Но даже при недостаточном времени УФ-задубливания покрытие из смеси SU-8:SiO₂ 1:1 имеет большую твердость, чем покрытие из смеси SU-8:SiO₂ 5:1.

Подбор правильного времени УФ-задубливания должен привести к подтверждению первоначального предположения о том, что введение в SU-8 нанопорошка SiO₂ повышает твердость планаризирующего покрытия.

Выводы

1. Планаризация подложек AlN с помощью легкоплавких стекол может сделать возможным последующее нанесение функциональных слоев, требующих отжига при температурах 400-500°C. Однако этот метод требует дополнительного оборудования (печей, сушильных шкафов).
2. Использование жидких стёкол SOG позволяет достичь шероховатости поверхности подложки, удовлетворяющей требованиям тонкоплёночной технологии (Rz=0,032 мкм).
3. Нанесения в качестве планаризирующего покрытия фоторезиста SU-8 технологично и не требует дорогостоящего оборудования. Диапазон рабочих температур изделий – до 250°C. Добавление наноразмерных порошков диоксида кремния влияет на его механические свойства (повышается твердость).

Литература

1. <http://www.telogik.ru/study-27-23.html>
2. В.А. Пилипенко, В.Н. Пономарь, В.А. Горушко, В.В. Понорядов, Н.С. Кускова, А.В. Демьянович. Планаризация межуровневого диэлектрика с использованием жидкого стекла [Текст] / В.А. Пилипенко, В.Н. Пономарь, В.А. Горушко, В.В. Понорядов, Н.С. Кускова, А.В. Демьянович // Вестник БГУ. – 2005 г. – № 3. – С. 32-36.
3. Nguyen Nhu Toan. Spin-on glass materials and applications in advanced IC technologies.- The Netherlands, Enschede : University of Twente, 1999. – 148 с.
4. <http://micromachine.narod.ru/su-8.htm>