

# Фотолитография

## В технологии изготовления плат силовых модулей специального назначения

**В статье представлен обзор технологий формирования медных проводников плат на теплоотводящем керамическом основании. Описан способ послойного нанесения сухого пленочного фоторезиста при создании квазимонолитного толстого слоя фоторезиста с целью получения методами контактной фотолитографии глубокого рельефа для гальванического осаждения меди. Приведены экспериментально подтвержденные результаты моделирования процесса экспонирования толстых слоев пленочного фоторезиста для полуаддитивной технологии производства плат силовых модулей.**

Юлия Боброва

utd-utd@yandex.ru

Михаил Андроник  
Василий Щербаков  
Игорь Китаев

### Введение

Основание из нитрида алюминия (далее — AlN) в совокупности с толстой медной коммутацией (толщиной более 50 мкм) является на момент написания данной статьи наиболее удачным решением, обеспечивающим оптимальный тепловой режим при функционировании силовых модулей. Увеличение площади сечения проводников приводит к снижению их теплового сопротивления, а теплоотводящее основание позволяет распределить и отвести (например, на корпус) тепло от высокоомощных радиоэлектронных элементов. Это препятствует возникновению локального перегрева компонентов силовых плат и способствует повышению стабильности и безотказности работы аппаратуры в целом.

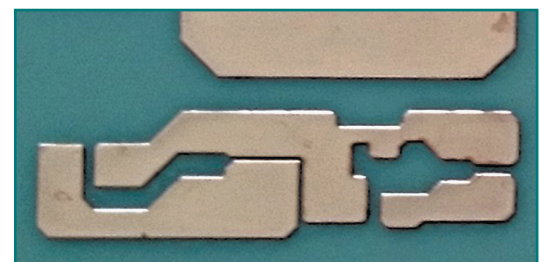
В 1970-е годы General Electric Company (США) запатентовала способ получения керамических подложек с металлизированной поверхностью: медная фольга без адгезионного подслоя напрямую напрессовывалась на керамику. В настоящее время технология получения керамических подложек, металлизированных прямым сращиванием меди с керамическим основанием, носит название DBC-технология (англ. Direct Bonded Copper). Медная фольга окисляется в зоне контакта с керамической подложкой и нагревается при приложении давления до состояния образования эвтектического сплава с подложкой. Сращивание медной фольги с AlN-керамикой, предварительно окисленной по поверхности, происходит по слою оксида  $Al_2O_3$  [1]. Толщина бескислородной медной фольги при этом составляет 0,127–0,508 мм, что при травлении проводников сопровождается боковым подтравом, соизмеримым с толщиной медной фольги.

Получить толстую фольгу на поверхности теплоотводящей керамики позволяют АМВ-технология (англ. Active Metal Braze) и ДИМЕТ-технология

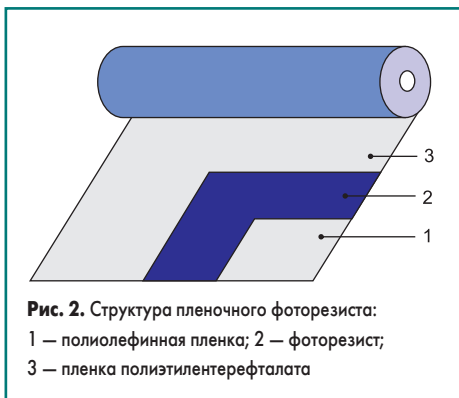
(ДИнамическая МЕТаллизация) [1]. Однако материалы, полученные с помощью этих технологий, предполагают формирование проводниковых структур жидкостным травлением, что также приводит к существенному боковому подтраву и ограничению на получаемый минимальный зазор и геометрию сечения проводника.

В ходе совместной работы кафедры «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана, АО «Концерн «Вега» и ОАО «МРТИ РАН» для получения плат источников питания с проводниками толщиной 100 мкм применялась полуаддитивная технология, позволяющая избежать недостатков, присущих керамическим теплоотводящим основаниям, металлизированным толстой медью по всей поверхности.

Вместо фольгированного стеклотекстолита (как это принято в технологии печатных плат) используется AlN с медью толщиной 0,5–1,5 мкм, напыленной на адгезионный подслоя хрома. После чего в слое фоторезиста толщиной на 10–20 мкм больше итоговой толщины медных проводниковых структур формируется рельеф с полостями, повторяющими



**Рис. 1.** Опытный образец платы источника тока, где толщина медных структур на AlN-основании составляет  $(100 \pm 5)$  мкм, минимальный зазор — 200 мкм



их геометрию. Полости гальванически заполняются медью, затем фоторезист удаляется и тонкие токопроводящие слои меди и хрома стравливаются. Проводниковые структуры осветляются в 5–10%-ном растворе серной (или соляной) кислоты, заготовка платы промывается и сушится (рис. 1).

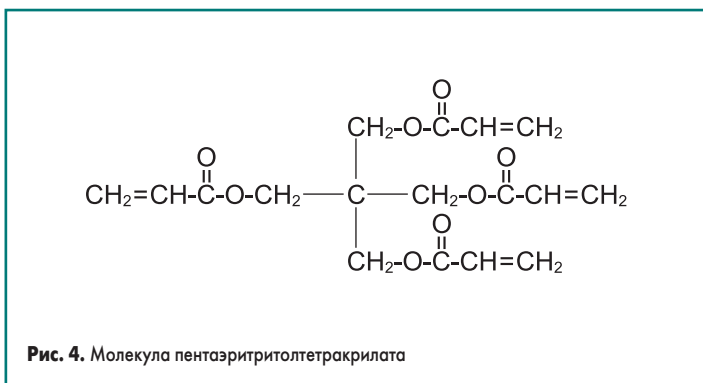
Новизна в применении полуаддитивной технологии для получения силовых плат на теплоотводящем основании состоит в бюджетном способе получения полостей в фоторезисте для гальванического выращивания проводников большой толщины с геометрией сечения, близкой к проектной. Фотолитография толстых слоев пленочного фоторезиста и способ их нанесения — это ключевой момент данной технологии изготовления силовых плат с минимальным боковым подтравом проводников большой толщины.

### Сухой пленочный фоторезист

В данной статье рассматривается процесс формирования топологии с отношением проводник/зазор (полость/фоторезист) более 80/80 мкм. Для получения рельефа с такими типоразмерами предпочтительны сухие пленочные фоторезисты (далее — СПФ) водощелочного проявления (рис. 2). Они обладают хорошей адгезией к подложке с токопроводящим слоем на поверхности, высокой стойкостью при гальванических процессах и обеспечивают защиту отверстий при реализации тентинг-метода [2] благодаря пленочной структуре.

Среди СПФ, получивших наибольшую популярность в стране, нужно выделить следующие фоторезисты:

- Riston, DuPont (США) толщиной 13, 20, 25, 33, 38, 50, 63, 75 и 100 мкм;
- Ordyl Alpha, Elga Europe (Италия) толщиной 15, 20, 25, 30, 40, 60, 75, 100 и 125 мкм;



- СПФ-1 и СПФ-2 (Россия) толщиной 20, 40 и 60 мкм.

Для формирования топологии внутренних слоев печатных плат тентинг-методом обычно достаточно фоторезиста толщиной не более 40 мкм, а для получения проводников внешних слоев (в частности, топологии плат источников питания электронных микромодулей) гальваническим методом слой фоторезиста может достигать 125 мкм. Особенный интерес представляет собой получение толстых слоев фоторезиста толщиной 25–40 мкм, имеющегося в наличии на любом предприятии, занятом производством печатных плат.

Фотоиницированная полимеризация никогда не использовалась в полупроводниковой литографии, требующей высокого разрешения, из-за кислородного эффекта (образования при взаимодействии с кислородом свободных радикалов, приводящих к полимеризации) и клейкости пленки. Но она нашла уникальное применение в технологии изготовления печатных плат в виде сухого многослойного пленочного полимерного сэндвича [3]. Структура пленочного фоторезиста состоит из трех частей, которые представлены на рис. 2.

Полиолефинная пленка изолирует слой фоторезиста от слипания в рулоне и снимается в процессе ламинирования заготовки. Пленка полиэтилентерефталата, через которую экспонируется фоторезист, защищает его от взаимодействия с кислородом — в ходе данного процесса фоторезист утрачивает свою липкость и фоточувствительность (кислородный эффект). Слой фоторезиста — клейкая фотополимеризующаяся смесь, состоящая из трех главных компонентов: акриловой полимерной основы, сшивающегося олигомера и фотоинициатора.

### Основа — акриловый полимер

Полимер является основой резиста, задавая его физические свойства. Он состоит из акриловых или метакриловых эфиров с акрило-

выми или метакриловыми кислотами (рис. 3). Максимальная молекулярная масса составляет 250 000 а. е. м.

Отношение –COOH и алкильных групп определяет легкость проявления и удаления резиста. Карбоксильная группа –COOH в процессе проявления входит в реакцию с NaOH или KOH, образуя водорастворимую соль.

### Сшивающий мономер (олигомер)

Сшивающий мономер (олигомер) состоит из моно- и многофункциональных акрилатов, наподобие пентаэритритолтетраакрилата (рис. 4), с четырьмя ненасыщенными связями. Молекулярная масса мономера определяет скорость полимеризации, интенсивность экспонирования и другие физические свойства, например запах.

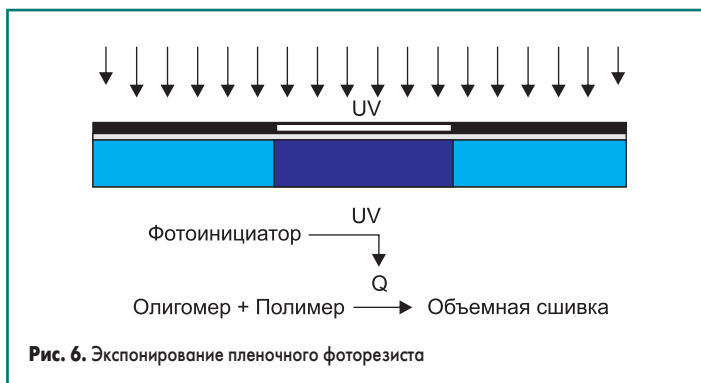
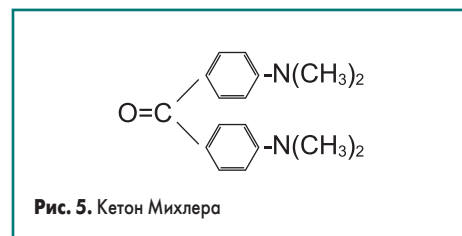
Эти олигомеры образуют с основной дисперсную систему, которая после экспонирования создает поперечно-связанную (высоко-связанную) объемную цепь полимера.

### Фотоинициаторы

Для осуществления полимеризации фоторезист нуждается в светочувствительных добавках, которые преобразуют поглощенную энергию в форму, позволяющую реализовать полимеризацию. Естественно, что они должны реагировать при тех же длинах волн, что и олигомер ( $\lambda_{\text{max}} = 365 \text{ нм}$ ).

Фотоинициаторы поглощают энергию фотонов и преобразуются в свободные радикалы, участвующие в реакции полимеризации. Примером такого инициатора является кетон Михлера (рис. 5), который имеет максимум поглощения при 355 нм [4]. Происходит экзотермическая реакция, а вырабатываемая энергия позволяет осуществлять полимеризацию.

При процессе экспонирования фотоинициатор преобразует энергию фотонов в термическую, и таким образом осуществляется процесс полимеризации олигомера и полимера (рис. 6).



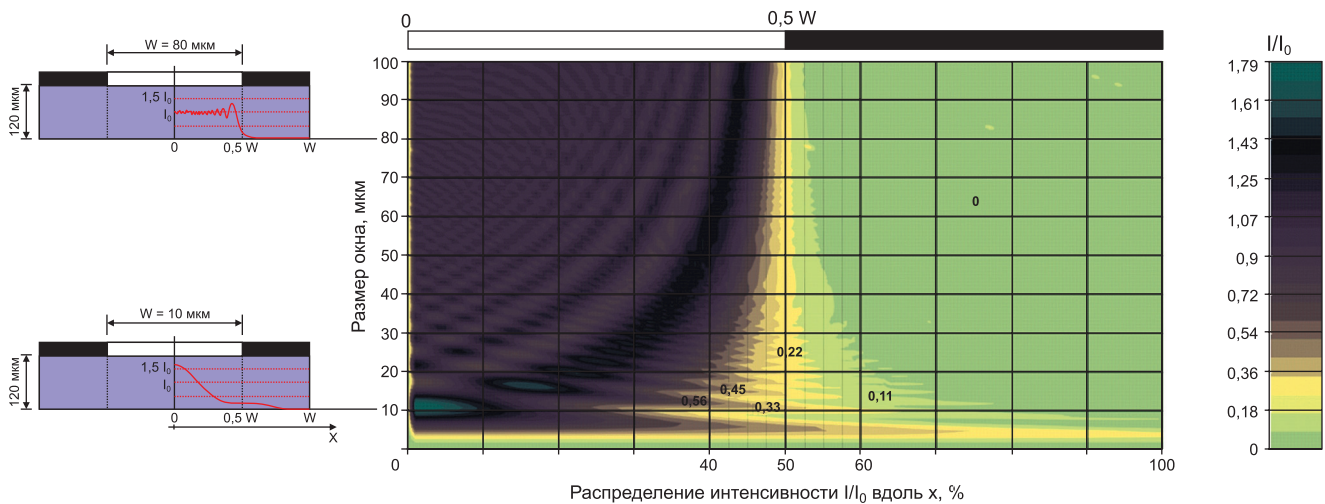


Рис. 7. Контактное экспонирование СПФ. Распределение интенсивности излучения по толщине фоторезиста (120 мкм) вдоль ширины окон различных размеров (w)

### Формирование толстого слоя пленочного фоторезиста

В России фоторезист Ordyl Alpha серии 300 используется производителями печатных плат на протяжении многих лет. В данной серии толщина резиста варьируется от 35 до 75 мкм. Ordyl Alpha 340 и 350 (толщина 40 и 50 мкм соответственно) имеет наибольший спрос, так как применим и для кислого травления, и для гальванических процессов в сернокислых электролитах меди. Для получения более толстого слоя фоторезиста (толщины, кратной начальной) предлагается послойное нанесение фоторезиста.

### Нанесение фоторезиста

Процесс послойного ламинирования не слишком отличается от традиционного ламинирования заготовок одним слоем фоторезиста с той лишь разницей, что перед нанесением каждого следующего слоя с предыдущего снимается защитная пленка. После снятия пленки ламинирование должно осуществляться максимально быстро с целью предотвращения взаимодействия кислорода воздуха с фоторезистом. Защитная пленка с последнего слоя СПФ не снимается. В результате такого нанесения получаются дискретные значения толщины пленки фоторезиста.

Эксперименты проводились с фоторезистом Ordyl Alpha 340. При нанесении трех слоев была получена толщина 110–115 мкм (с учетом усадки фоторезиста после термического задубливания). Послойно получаемое покрытие из фоторезиста Ordyl Alpha 340 показало хорошую межслойную адгезию. Созданный толстый слой фоторезиста на протяжении всех технологических операций проявлял свойства сплошного слоя.

### Экспонирование

При рассмотрении факторов, влияющих на получаемый в фоторезисте рельеф, можно выделить наиболее значимые: рассеивание

лучей, явление дифракции и свойства фоторезиста. Доза экспонирования должна быть такой, чтобы обеспечить хорошую адгезию толстого слоя фоторезиста с поверхностью подложки, но не переэкспонировать, получая существенные отклонения размеров (уменьшение зазоров). Переэкспонирование усиливает влияние дифракции, рассеивание лучей и отражение от подложки. Отклонения излучаемого пучка при контактной фотолитографии не превышают  $0,5^\circ$ , что не существенно при экспонировании таких толщин.

Был проведен расчет дифракции вглубь фоторезиста, который показал малое влияние дифракции на засвечивание фоторезиста за границами окна (прозрачной области) в фототаблице (рис. 7). Для ширины окна 80 мкм подсвечивание составляет 22% от номинальной интенсивности излучения на расстоянии меньше чем 2 мкм за пределами окна в фототаблице. Для окон меньше 80 мкм данная величина постепенно повышается.

Был промоделирован процесс поглощения излучения по толщине фоторезиста. Данное явление описано законом Бугера — Ламберта — Бера:

$$I = I_0 e^{-\alpha h},$$

где  $h$  — толщина, в которой изменяется интенсивность;  $I_0$  — изначальная интенсивность;  $\alpha$  — показатель поглощения, определяющий расстояние  $h$ , которое проходит луч через фоторезист и при котором интенсивность активного излучения  $I_0$  уменьшается в  $e$  раз.

Было предположено, что для пленочных фоторезистов Ordyl Alpha различных серий показатели поглощения  $\alpha$  не сильно отличаются друг от друга. С помощью данных из технической документации [5] было получено значение  $\alpha = 23,6 \text{ см}^{-1}$ .

Проведен эксперимент по определению минимального времени экспонирования — времени при проявлении, после которого только появляется сцепление фоторезиста с поверхностью подложки. Оно соответствует дозе излучения, попадающего на нижний слой

фоторезиста (место контакта с подложкой). Так как поглощение света зависит от толщины фоторезиста, то для разных толщин разные интенсивности излучения создадут минимальную дозу, необходимую для полимеризации фоторезиста и его последующей адгезии в зоне контакта с подложкой.

В ходе эксперимента экспонирование проводилось на установке экспонирования заготовок печатных плат AZ 210, Mega Electronics. Было получено минимальное время экспонирования, при котором фоторезист после полимеризации остается на подложке: 8, 10, 12 с для 40, 120 и 160 мкм соответственно.

При толщине фоторезиста, равной 40 мкм, пропускается 91% излучения, при 120 мкм — 75%, а при 160 мкм — 68% (таблица).

Таблица. Данные по экспонированию 1, 3 и 4 слоев фоторезиста

Кол-во слоев СПФ	$I/I_0, \%$	Коэффициент увеличения дозы	Ожидаемое минимальное время, с	Экспериментально подтвержденное минимальное время, с
1	91%	1	—	8
3	75%	1,21	9,68	10
4	68%	1,33	10,64	12

Данный эксперимент доказывает малое влияние показателя поглощения на дозу экспонирования. Для формирования защитного рельефа, стойкого к технологическим воздействиям последующих процессов, доза экспонирования должна обеспечить оптимальную сшивку олигомера и поверхности подложки. Такая доза нужна для прохождения реакции с участием фотоинициатора.

Результаты эксперимента указывают на то, что в интервале толщин фоторезиста от 40 до 120 мкм линейная аппроксимация дозы будет правильной. Выявлено, что для получения рельефа в фоторезисте 120 мкм рекомендуемое время экспонирования на установках типа AZ 210 (мощность ламп 2,5–3,5 мВт/см<sup>2</sup>) составляет 30 с.

**Проявление**

Время проявления обычно линейная функция от толщины [3]. Для полного проявления рисунка время погружной обработки в 0,8–1,2%-ном водном растворе  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  составило 11 мин для 120 мкм и 2 мин при 40 мкм.

**Заключение**

В ходе исследования доказана возможность применения послойного нанесения сухого пленочного фоторезиста с целью получения квазимонолитного толстого слоя фоторезиста для получения методами контактной фотолитографии глубокого рельефа для гальва-

нического формирования толстых медных проводников.

Платы силовых модулей на теплоотводящем керамическом основании, изготавливаемые по полуаддитивной технологии, отвечают требованиям микроминиатюризации, поскольку могут быть выполнены согласно нормам проводник/зазор 80/80 мкм, что недостижимо при применении субтрактивной технологии. ■■■

**Литература**

1. Непочатов Ю. и др. Разработка технологии изготовления металлизированных подложек для изделий силовой электроники // Современная электроника. 2010. № 9.

2. Dry Film Photoresist. Technical Process Guide. Troubleshooting Guide // Cookson Electronics, 2002. [www.inter-conti.cz/pdf/enthone/Photec%20Technical%20Process%20Guide.pdf](http://www.inter-conti.cz/pdf/enthone/Photec%20Technical%20Process%20Guide.pdf)
3. Моро У. Микролитография: В 2-х частях. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
4. Новые материалы / Под науч. ред. Ю.С. Карабасова. М.: Мисис, 2002.
5. Ordyl dry film Alpha 900. Elga Europe, 2003. [www.cmi.epfl.ch/packaging/files/Laminators/ORDYL.pdf](http://www.cmi.epfl.ch/packaging/files/Laminators/ORDYL.pdf)
6. Боброва Ю., Андроник М., Щербаков В., Китаев И. Фотолитография в технологии изготовления плат силовых модулей специального назначения // Наноинженерия. 2015. № 9, с. 8–13.