

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова  
Кафедра микроэлектроники и общей физики

# **МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ**

Практикум

Ярославль  
ЯрГУ  
2019

УДК 621.38(076.5)  
ББК 385я73  
М34

*Рекомендовано*  
*Редакционно-издательским советом университета*  
*в качестве учебного издания. План 2019 года*

Рецензент  
кафедра микроэлектроники и общей физики ЯрГУ

Составители:  
С. П. Зимин, Е. С. Горлачев

**Материалы электронной техники : практикум**  
М34 / сост. : С. П. Зимин, Е. С. Горлачев ; Яросл. гос. ун-т  
им. П. Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2019. — 20 с.

Практикум дополняет новыми лабораторными работами изданное 2012 г. «Руководство по проведению лабораторных работ «Материалы электронной техники». Содержит теоретические сведения и порядок выполнения лабораторных работ по изучению материалов подложек для гибридных интегральных схем и описанию методов определения размеров зерен в материалах с поликристаллической структурой.

Предназначен для студентов, изучающих дисциплину «Материалы электронной техники».

УДК 621.38(076.5)  
ББК 385я73

© ЯрГУ, 2019

# Лабораторная работа 1Д

## Материалы подложек для гибридных интегральных схем

**Цель работы:** анализ подложек гибридных интегральных схем, проведение их классификации, изучение подложек методами оптической микроскопии.

**Приборы и принадлежности:** оптический микроскоп МИР-12, образцы подложек стекла, ситалла СТ-50, поликора, алюминиевой керамики 22ХС, сапфира.

### *Краткая теория к работе*

Подложка гибридной интегральной схемы (ГИС) является её конструктивным основанием, на поверхности которого формируются пассивные и активные элементы. Подложки ГИС непосредственно не участвуют (за исключением СВЧ-схем) в преобразовании и передаче сигналов. Они изготавливаются из диэлектрических материалов, обеспечивая электрическую изоляцию элементов и отвод тепла, выделяемого при работе схемы. Гибридные интегральные схемы изготавливаются по двум технологиям. Тонкопленочные ГИС создаются последовательным нанесением на подложку тонких пленок толщиной менее 1 мкм при помощи напыления в вакууме или ионного распыления с формированием рисунка в каждом слое методом фотолитографии. В толстопленочных ГИС пленочные пассивные элементы толщиной 10–50 мкм создаются методом трафаретной печати с последующей операцией вжигания при температуре 600–1000°C. Различные температурные режимы для двух технологий определяют выбор подложек с разными свойствами. К материалу подложки предъявляются следующие требования.

1. Хорошие электроизоляционные свойства: высокое удельное сопротивление  $\rho_v > 10^{10}$  Ом·м, малая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon < 10$ , малый тангенс угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ). Эти свойства обеспечивают надежную электрическую изоляцию и отсутствие паразитных емкостных связей между элементами интегральной схемы (ИС).

2. Высокая чистота обработки поверхности подложки (12–14 класс), необходимая для обеспечения однородности

и воспроизводимости электрических параметров элементов ИС. Несовершенства поверхности подложки передаются в нанесенные на них пленки. На более грубых поверхностях получаются пленки с большим сопротивлением и низкой стабильностью. Особенно чувствительны к дефектам подложки диэлектрические пленки. Уменьшение толщины диэлектрической пленки конденсатора на микронеровностях подложки может вызвать пробой. Исходя из этого высота микронеровностей подложки не должна превышать 0,025 мкм для тонкопленочных ИС, тогда как для толстопленочных ИС она может достигать 0,5 мкм.

3. Высокая плоскостность для обеспечения плотного прилегания шаблона (маски) к подложке в тонкопленочных ГИС ( $\pm 1$  мкм/мм) и равномерности зазора между трафаретом и подложкой в толстопленочных ГИС ( $\pm 0,04$  мм/мм).

4. Низкая пористость поверхности и объема подложки для исключения интенсивного газовыделения, изменяющего параметры элементов ИС.

5. Высокая теплопроводность материала подложки уменьшает разогрев элементов схемы, позволяет достигнуть более высокой плотности упаковки и повышает допустимую рассеиваемую мощность ГИС.

6. Высокая термостойкость (600...1000 °С) и стойкость к термоударам обеспечивают возможность нагревания подложки при изготовлении ГИС (в процессе нанесения пленок или высокотемпературного отжига).

7. Химическая инертность к осаждаемым материалам и химическим растворам-травителям необходима для стабильного воспроизведения параметров схемы.

8. Температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) подложки должны быть предельно согласованы с соответствующими параметрами пленок для минимизации механических напряжений в пленочных структурах.

9. Высокая механическая прочность при малых толщинах способствует сохранению целостности подложек при изготовлении и эксплуатации ГИС.

10. Невысокая стоимость подложки обеспечивает экономическую целесообразность выбора типа подложки.

Материалов, которые идеально удовлетворяли бы всем требованиям, очевидно, не существует, поэтому выбор материала подложки производится с учетом требований технологии и области применения. Для подложек используют неорганические диэлектрические материалы, аморфные и поликристаллические — стекло, ситалл, керамику.

Отличительной особенностью подложек микрополосковых СВЧ-схем (3–30 ГГц) является то, что диэлектрическая подложка не только служит пассивным основанием, но и имеет функциональное назначение. Полосковая линия передачи образуется в толще между нижней металлизированной поверхностью и проводником, нанесенным на верхнюю поверхность, поэтому основным критерием при выборе подложек для схем СВЧ является сочетание высокой диэлектрической проницаемости с малыми диэлектрическими потерями ( $\text{tg}\delta \sim 10^{-4}$ ).

### **Сравнительные характеристики материалов, применяемых для изготовления подложек ГИС**

В качестве подложек для тонкопленочных ГИС используют стекло и ситалл, а для толстопленочных — керамику.

**Подложки из стекла.** Первыми материалами, использованными для подложек тонкопленочных ГИС, были стекла. Они представляют собой неорганические аморфные термопластичные материалы, получаемые путем переохлаждения жидкого расплава окислов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$  и др.). К достоинствам стеклянных подложек относится возможность получения высокой чистоты поверхности и высокой плоскостности (1 мкм/мм), отсутствие пор и влагопроницаемости, низкая стоимость. Однако низкая механическая прочность и низкая теплопроводность (см. табл. 1) ограничивают их применение.

**Подложки из ситалла.** Основным материалом для подложек тонкопленочных ГИС являются ситаллы. К ситаллам относят материалы, получаемые, подобно стеклу, сплавлением неорганических окислов, но подвергаемые затем управляемой кристаллизации. Кристаллическая фаза у ситаллов составляет 60–95% объема. В результате формируется продукт кристаллизации стекла с очень мелкими (0,01–1 мкм) и равномерно распределенными по объему кристаллами, соединенными аморфными прослойками остаточного стекла.

Микрокристаллическая структура ситаллов обусловлена соответствующим составом стекла. Кроме того, в них еще вводят специальные катализаторы кристаллизации, которыми могут быть благородные металлы (золото, серебро, платина), а также чистая медь. Эти катализаторы, вводимые в очень малых количествах, вызывают кристаллизацию при облучении ультрафиолетовым светом или  $\gamma$ -лучами. Так получают фотоситаллы. Катализаторами могут быть и окислы металлов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  и др.), хорошо растворимые в стекле. Эти катализаторы вызывают кристаллизацию при ступенчатой термической обработке при температурах 550–1100 °С. Так получают термоситаллы. Благодаря высокой степени кристаллизации ситаллы обладают ценным сочетанием физико-химических свойств: механической прочностью, твердостью, термической и химической стойкостью, а также хорошими электрическими свойствами. Доступность сырья и простая технология обеспечивают невысокую стоимость изделий.

Ситаллы занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой. Ситаллы — плотные материалы от белого до коричневого цвета, сочетающие высокие диэлектрические и температурные свойства. Ситалл хорошо обрабатывается, полируется, обладает малой газопроницаемостью. Большинство ситаллов представляют собой композиции на основе стекла  $\text{SiO}_2$  и окиси алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  с добавлением  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и пр.

Условное обозначение марок стекла и ситалла состоит из буквенного кода (С — стекло, СТ — ситалл), следующая за ним цифра — значение температурного коэффициента линейного расширения  $\text{ТКЛР} \times 10^7 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , далее следует номер разработки. Например, СТ-50-1, ситалл,  $\text{ТКЛР} = 50 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , первая разработка. Для подложек ИС применяются ситаллы СТ-50-1, СТ-50-2, СТ-32-1 и другие.

**Подложки из керамики.** Керамика — материал, получаемый спеканием под высоким давлением массы, состоящей из окислов металлов, нитридов или карбидов. Керамика является поликристаллическим материалом, прочность и монолитность которого обеспечиваются стекловидной прослойкой между кристаллами, а свойства зависят от химического, фазового составов и технологии изготовления. Для получения керамических подложек с чистотой поверхности 12 класса необходима керамика мелкокри-

сталлической структуры с размерами зерен не более 3 мкм, однофазная, с минимальным содержанием стекла. Этим требованиям удовлетворяют чистые окислы. В настоящее время основным материалом для подложек является окись алюминия  $Al_2O_3$  (поликор); в особых случаях применяется окись бериллия  $BeO$  (брокерит).

Марки керамических материалов для подложек:

- 1) 22ХС — 96 %  $Al_2O_3$ , кристаллическая фаза 89 %;
- 2) поликор — 99,7 %  $Al_2O_3$ , кристаллическая фаза 99 %;
- 3) брокерит — 95–98 %  $BeO$  + (3–5) %  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $SiO_2$ .

Особенностью подложек из окиси бериллия является их высокая теплопроводность величиной до 325 Вт/(м·град), превосходящая теплопроводность чистого бериллия и даже алюминия. Поэтому их используют для мощных ГИС. Недостатком бериллиевой керамики является токсичность бериллиевой пыли.

Большинство керамических подложек имеет заметную кривизну (~0,04 мм/мм) и шероховатость поверхности, возникающую при отжиге. Для обеспечения необходимой чистоты поверхности подложку подвергают шлифованию с последующим полированием. Однако керамические подложки уступают стеклянным и ситалловым по чистоте поверхности и плоскостности, а также имеют более высокую стоимость, особенно подложки из брокерита. Подложки из брокерита в сто раз дороже подложек из стекла, что объясняется высокой стоимостью сырья и сложностью производства. Полировка керамических подложек увеличивает их стоимость в три раза.

Основные достоинства керамических подложек:

- 1) высокая теплопроводность (на 1–2 порядка выше, чем у ситалловых);
- 2) высокая механическая прочность;
- 3) высокая термическая стабильность (до 2000 °С);
- 4) малый тангенс угла диэлектрических потерь.

Параметры основных материалов для подложек ГИС приведены в табл. 1.

**Другие виды подложек.** Наряду с описанными в технологии ГИС могут быть использованы другие подложки. Прежде всего, это металлические подложки, покрытые слоем диэлектрика. Обычно применяют подложки алюминиевые, покрытые слоем диэлектрика толщиной 40–60 мкм или эмалированные стальные.

Таблица 1

**Параметры основных подложек для ГИС**

Материал подложки	Стекло С-41-1	Ситалл СТ-50-1	Керамика		
			22ХС	Поликор	Брокерит
Класс чистоты	14	13–14	12	12–14	14
$\varepsilon$ при $f = 1$ МГц	7,5	8,5	10,3	10,5	6,3
$\operatorname{tg} \delta$ при $f = 1$ МГц	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Удельное сопротивление $\rho_v$ , Ом·м	$10^{10}$	$10^{11}$	$10^{12}$	$10^{12}$	$10^{13}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·град)	1,2	1,4	21	32	210
Температура размягчения, °С	620	930	1650	1650	–
ТКЛР, град <sup>-1</sup>	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности при изгибе, МПа	5	80	460	280	150



Их применяют для изготовления тонкопленочных ГИС, когда требуется обеспечить хороший теплоотвод, высокую механическую прочность.

В тонкопленочной технологии могут быть использованы полиимидные пленки толщиной до 100 мкм. Полиимид — класс термостойких полимеров с работоспособностью до 200 °С. Недостатком материала является сравнительно высокое влагопоглощение, поэтому полиимидная пленка нуждается в технологической сушке и защите.

Для ГИС, работающих в СВЧ-диапазоне, может быть применен сапфир — монокристаллический оксид алюминия. Он обладает малыми диэлектрическими потерями в СВЧ-диапазоне, высокой теплопроводностью, механической прочностью, устойчивостью к воздействию высокой температуры. Материал хорошо полируется до 14 класса чистоты. Стоимость сапфировых подложек крайне высока, что ограничивает область их практического применения.

### ***Порядок выполнения работы***

1. Ознакомиться с предложенным набором подложек, определить их материал. Провести измерение геометрических параметров подложек (соответствие стандарту).

2. На оптическом микроскопе «МИР-12» рассмотреть особенности рабочей и обратной сторон предложенного набора подложек, описать особенности структуры поверхности рабочей стороны и обратной стороны подложек.

3. Сформулировать выводы по работе, в которых указать основные особенности подложек для ГИС.

### ***Литература***

1. Руководство по проведению лабораторных работ «Материалы электронной техники» : лабораторный практикум / сост. : С. П. Зимин, Е. С. Горлачев. — Ярославль : ЯрГУ, 2012. — 60 с.

2. Процессы микро- и нанотехнологий : лабораторный практикум. Ч. 2 / сост. : Д. А. Шутов, Д. В. Ситанов. — Иваново : ИГХТУ, 2006. — 135 с.

3. Учебное пособие к лабораторным работам по курсу «Материалы электронных средств» / сост. : В. Н. Постникова, С. Н. Кузнецов, Ю. В. Каширин. — М. : МАИ, 2006. — 44 с.

## Лабораторная работа 2Д

### Определение размеров зерен в поликристаллах

**Цель работы:** ознакомление с основными методами определения размеров зерен в поликристаллических материалах, оценка размеров зерен конкретных поликристаллов на основании анализа электронно-микроскопических изображений.

**Приборы и принадлежности:** набор электронных микрофотографий поликристаллических образцов.

#### *Краткая теория к работе*

#### **Основные термины**

#### **для описания поликристаллической структуры**

Кристаллические твердые тела могут иметь монокристаллическое или поликристаллическое строение. *Монокристаллы* — твердые тела, атомы которых принадлежат единой кристаллической решетке. *Поликристаллы* — твердые тела, состоящие из множества различно ориентированных зерен, отделенных друг от друга границами. *Границей* называется поверхность, по обе стороны от которой кристаллические решетки различаются пространственной ориентацией: ортогональная система координат одного из соседних зерен повернута относительно системы координат другого зерна. Граница зерен представляет собой переходный слой шириной 1–5 нм, в котором нарушена правильность расположения атомов, имеются скопления дислокаций и повышена концентрация примесей внедрения (атомы кислорода, углерода, азота и т. д.). Границы между зернами поликристаллов являются *большеуговыми*, угол разориентации при этом составляет более 15 градусов. Если внутри зерен поликристалла наблюдаются более мелкие разориентированные области, то говорят о субзеренной, фрагментированной и блочной субструктуре. Если угол взаимной разориентации между соседними блоками, субзернами или фрагментами не превышает 15 градусов, то такие границы называют *малоуговыми*.

Величина зерна существенным образом влияет на свойства материалов. Такие механические свойства металлов и сплавов, как предел текучести и твердость, тем больше, чем меньше раз-

мер зерна. Для ряда металлов и сплавов при уменьшении размера зерна (менее 10 мкм) при определенных температурно-скоростных условиях деформации реализуется явление аномально высокой пластичности (*сверхпластичности*). Размер зерен влияет также на физические свойства. Так, в ферромагнитных сплавах, чем больше средний размер зерен, тем больше магнитная проницаемость. Вдоль границ зерен быстрее, чем в объеме кристалла, протекает диффузия, особенно при нагреве. Границы зерен и особенно стыки нескольких зерен являются местами преимущественного образования зародышей рекристаллизации и новой фазы. Размеры зерен существенным образом влияют на электропроводность поликристаллических пленок, а на границах полупроводниковых материалов могут возникать области с иным типом проводимости, чем в объеме зерна, что обуславливает дополнительные потенциальные барьеры для носителей заряда.

Размер зерен может меняться в очень широких пределах, общая классификация поликристаллических материалов приведена в табл. 2.

Таблица 2

***Классификация поликристаллов  
в зависимости от размеров зерен***

<b>Тип зеренной структуры</b>	<b>Размер зерен</b>
Нанокристаллы	10...100 нм
Микрокристаллы	0,1...1 мкм
Мелкозернистый поликристалл	1...10 мкм
Поликристалл	10...100 мкм
Крупнозернистый поликристалл	100 мкм...несколько мм
Монокристалл	несколько мм...весь образец

**Количественные характеристики зерен**

В идеализированной однофазной структуре поликристаллического материала зерна (кристаллиты) имеют форму, которая определяется числом зародышей (например, центров кристаллизации) и линейной скоростью их роста. Если центры кристалли-

зации были равномерно распределены в объеме и скорости их роста в разных направлениях одинаковы, то в идеальном случае образующиеся зерна окажутся выпуклыми многогранниками, по форме близкими к кубическому октаэдру (рис. 1 а). При этом средний угол между гранями в плоском сечении равен  $120^\circ$ , а число зерен, имеющих общее ребро, равно трем. Это означает, что плоское сечение зерен чаще всего имеет форму более или менее правильного шестиугольника (рис. 1 б).

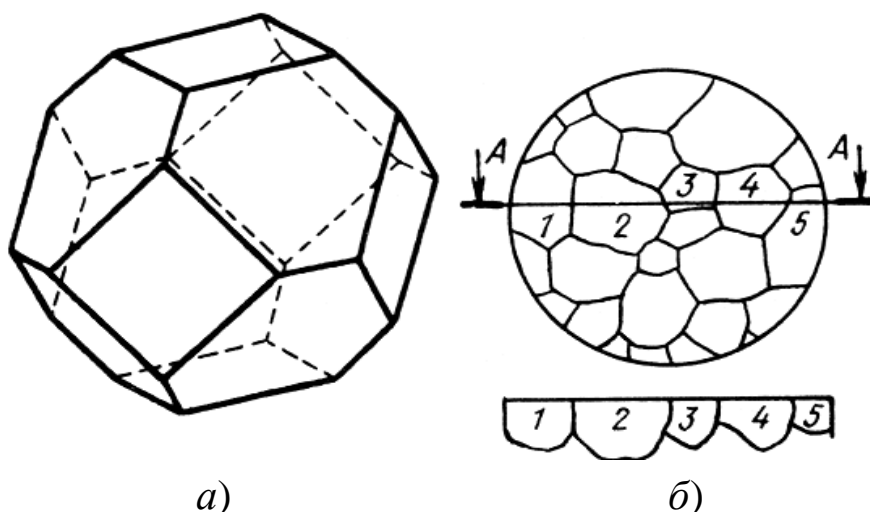


Рис. 1. Сечение зеренной структуры:  
а — идеализированная объемная форма зерна; б — сечение зеренной структуры случайным плоскостью (шлифа) по А-А

Для количественной оценки поликристаллической структуры используют следующие параметры:

- 1) средний размер (диаметр) зерна на плоскости шлифа  $d$  (мкм или мм);
- 2) средний объемный размер (объемный диаметр) —  $D_V$  (мкм или мм);
- 3) удельная поверхность границ зерен (в единице объема) —  $S_V$  ( $\text{мм}^2/\text{мм}^3$ );
- 4) число зерен в единице объема —  $N_V$ , ( $1/\text{мм}^3$ ).

Все перечисленные характеристики есть средние величины, которые не описывают возможное разнообразие размеров зерен. Для описания структуры с различными размерами зерен используют функцию распределения зерен по размерам  $N_V(D)$ .

Важно отметить, что объемный диаметр  $D$  всегда больше, чем плоский диаметр  $d$ , т. к. плоскость шлифа лишь в редких

случаях проходит через центр зерна (рис. 1 б). Величины  $D_V$ , и  $d$  связаны приблизительным соотношением:

$$d \approx \frac{8}{3\pi} D_V \approx 0,85 D_V. \quad (2.1)$$

### **Методы количественной оценки средних размеров зерна**

Существует несколько методов описания размеров зерна поликристаллической структуры, основные из них рассмотрим далее.

*Метод подсчета зерен* заключается в определении количества зерен на единице поверхности шлифа с последующим вычислением средней площади зерна и среднего размера зерна. В этом методе изображение исследуемой структуры (микрофотографии) очерчивается прямоугольником известной площади  $F$  (рис. 2). Подсчитав среднее число зерен внутри прямоугольника  $n$ , легко определить среднюю площадь одного зерна  $\bar{A}$ :

$$\bar{A} = \frac{F}{n}. \quad (2.2)$$

По *методике Джеффриса* число зерен  $n$ , попавших в прямоугольник (квадрат), подсчитывают по формуле

$$n = p + \frac{1}{2} g + 1, \quad (2.3)$$

где  $p$  — число зерен, целиком находящихся в квадрате;  $g$  — число зерен, пересекаемых стороной квадрата (в среднем можно считать, что половина зерна находится в квадрате); единица учитывает четыре зерна, находящихся в углах квадрата и в среднем на 1/4 принадлежащих ему (рис. 2).

В случае рамки круглой формы расчет числа зерен проводится по формуле

$$n = p + \frac{1}{2} g. \quad (2.4)$$

В рамках *методики Салтыкова* число  $n$  подсчитывают, используя число узлов  $N_3$ , т. е. число стыков трех границ зерен. Из простых соображений следует, что

$$n = \frac{1}{2} N_3. \quad (2.5)$$

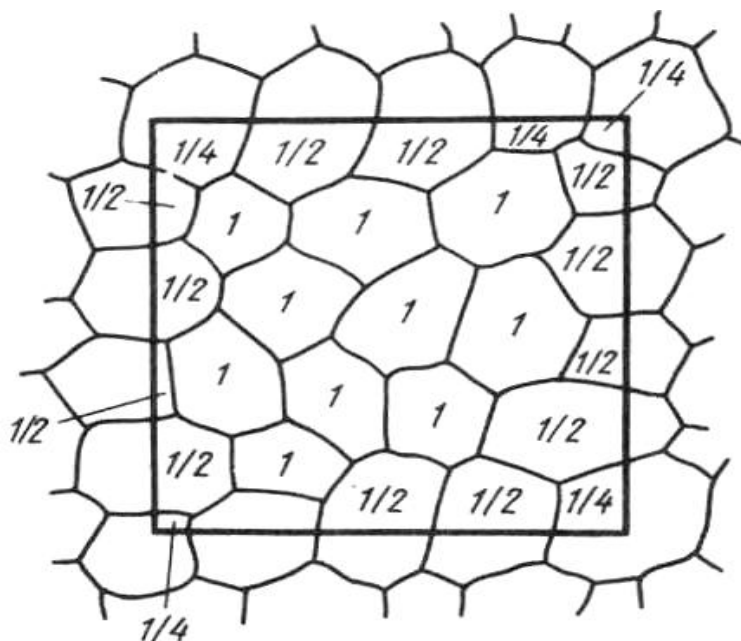


Рис. 2. Схема определения числа зерен, попавших в прямоугольник (методика Джеффриса)

При подсчете зерен или стыков рекомендуется выбирать размеры рамок такими, чтобы в них попадало на менее 10–20 зерен. Средний размер зерна определяется в данной методике как  $d = \sqrt{A}$ .

*Метод подсчета пересечений границ зерен* состоит в том, что на исследуемую микрофотографию наносят несколько отрезков в разных направлениях с суммарной длиной  $L$ . Далее считается число пересечений этих отрезков с границами зерен  $N$ . Средний размер зерна вычисляют по формуле

$$d = \frac{L}{N}. \quad (2.6)$$

*Построение распределения зерен по размерам методом измерения длин хорд (метод хорд Спектора)* получило наибольшее применение в случае разноразмерной структуры, где общее усреднение является неприемлемым. На изображение наносят несколько линий в разных направлениях. Последовательно из-

меряются длины хорд  $l_i$ , образованных пересечением случайной секущей с границами зерен (рис. 3). На основании полученного массива значений проводится построение гистограмм распределения зерен по размерам. Общее число требуемых измерений зависит от однородности размеров зерна и требуемой точности. Так, при достоверности 90 % и при ошибке 10 % число пересеченных зерен должно быть не менее 250, при ошибке 5 % — не менее 1000. Для однородных поликристаллических материалов число измерений может быть меньше. Средний размер зерна определяется в этом случае как среднее арифметическое измеренных значений  $l_i$ .

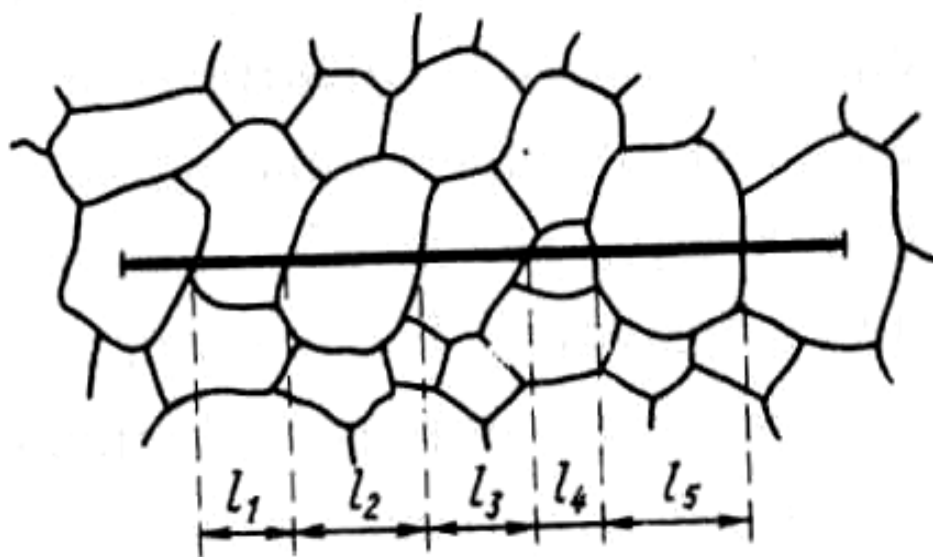


Рис. 3. Случайная секущая, наложенная на зеренную структуру, и длины хорд отдельных зерен  $l_1$ – $l_5$

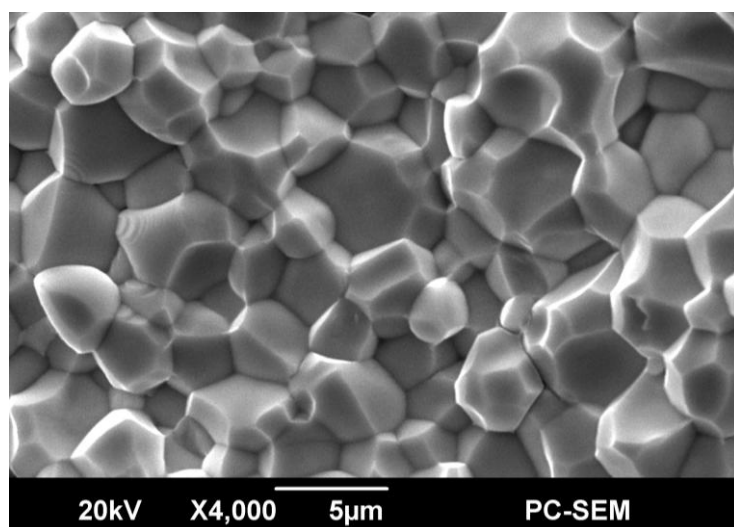
### ***Порядок выполнения работы***

1. Ознакомиться с методиками определения размеров зерен в поликристаллических образцах.
2. Получить у преподавателя индивидуальное задание и оценить размеры кристаллитов разными методами для конкретных образцов на основании изображений (приложение, а — з), полученных методом растровой электронной микроскопии.
3. Сформулировать выводы по работе, в которых дать полную характеристику исследуемых в задании поликристаллов.

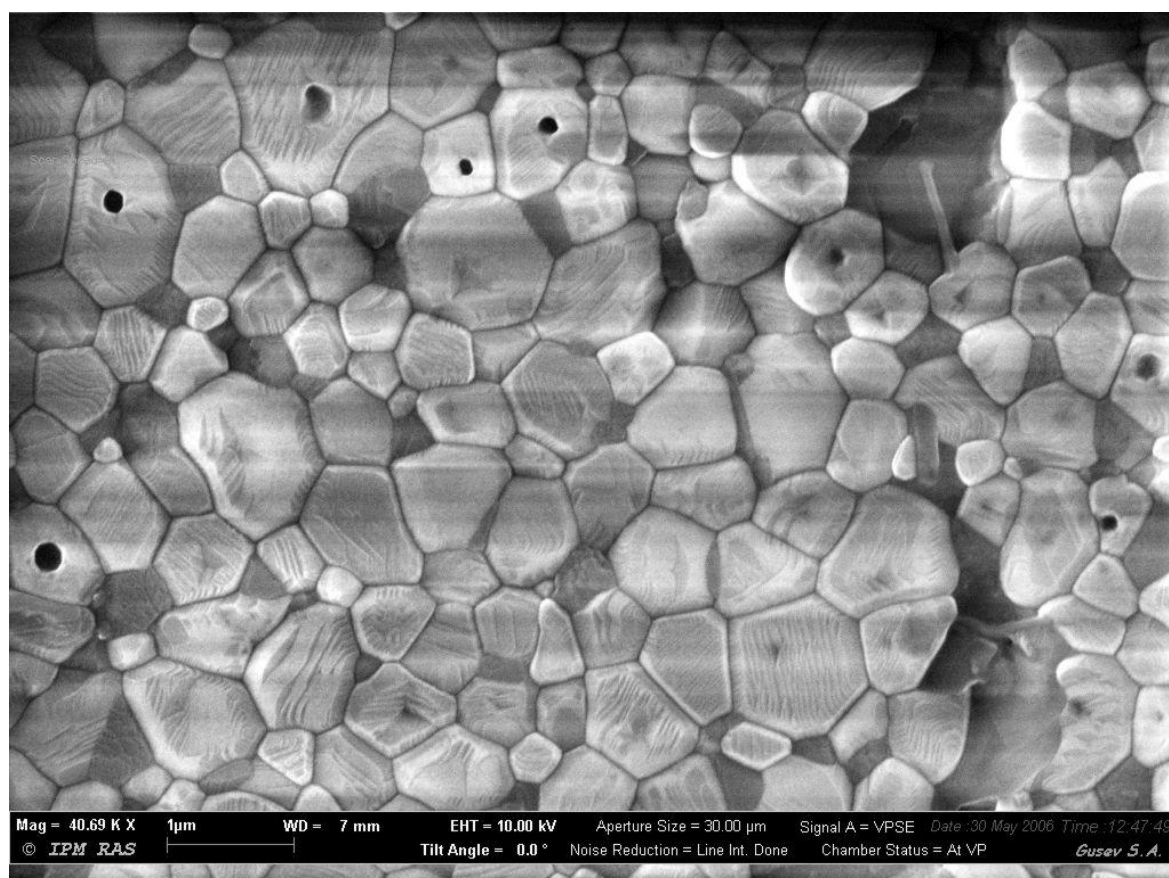
## *Литература*

1. Определение размера зерна поликристаллов : методические указания к лабораторной работе / сост. : Д. В. Лычагин, О. Б. Перевалова. — Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2008. — 31 с.
2. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. — М. : Изд-во стандартов. — 21 с.
3. ГОСТ 21073.3-75. Металлы цветные. Определение величины зерна методом подсчета пересечений зерен. — М. : Изд-во стандартов. — 17 с.
4. Кристаллография и металлография : лабораторный практикум / сост. : М. Ж. Тусупбекова, П. О. Быков, А. В. Богомоллов. — Павлодар : Кереку, 2008. — 84 с.
5. Степанова, Н. Н. Методы исследования материалов и процессов : учеб. пособие / Н. Н. Степанова. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. — 133 с.

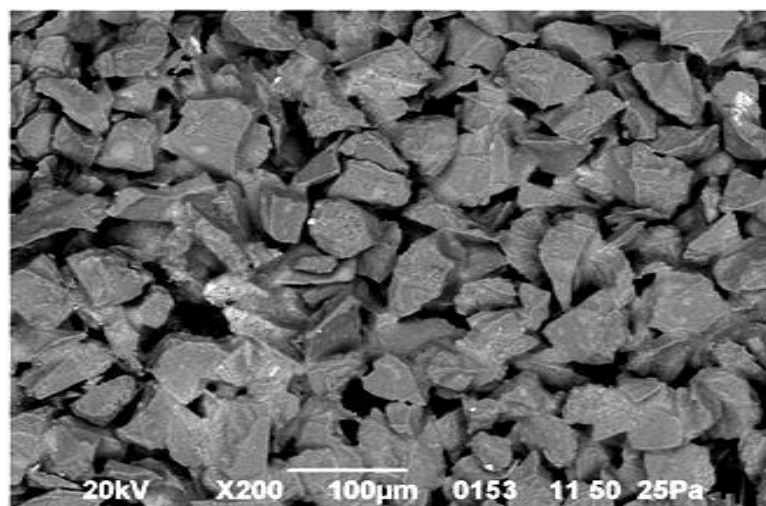




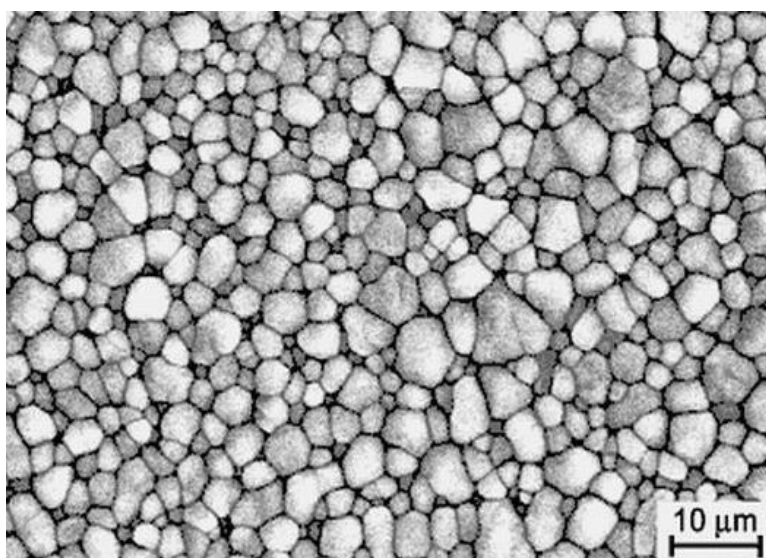
*a*



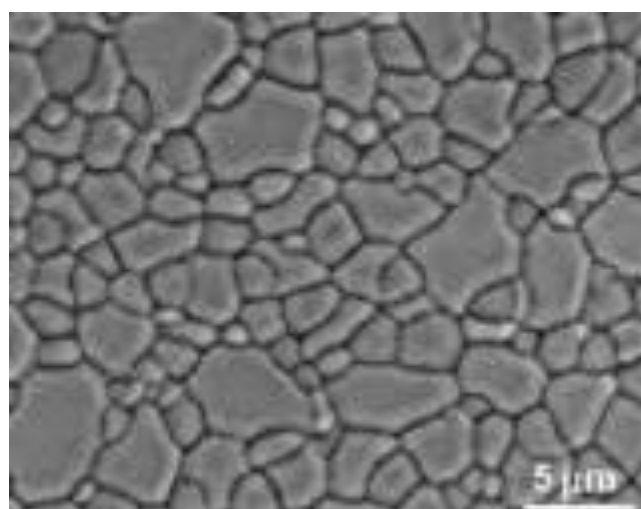
*б*



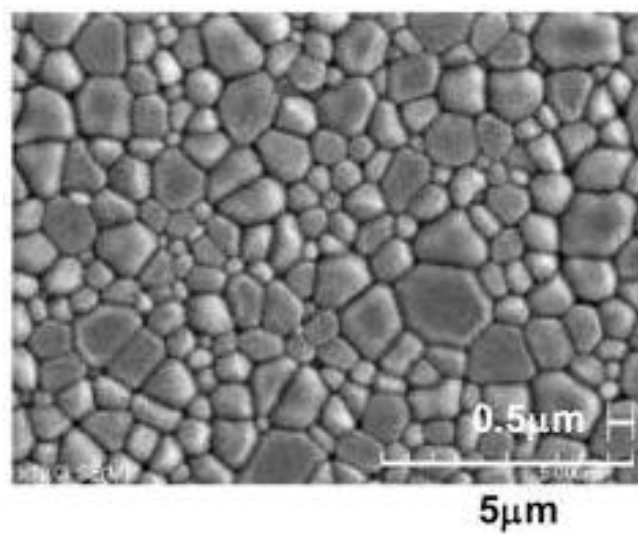
***б***



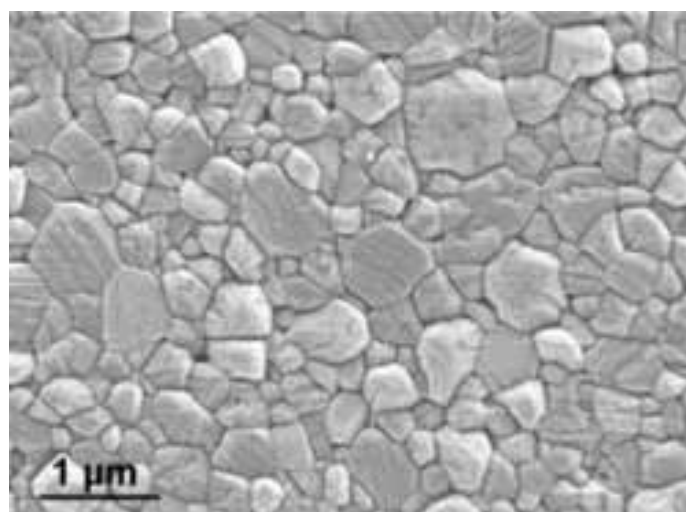
***в***



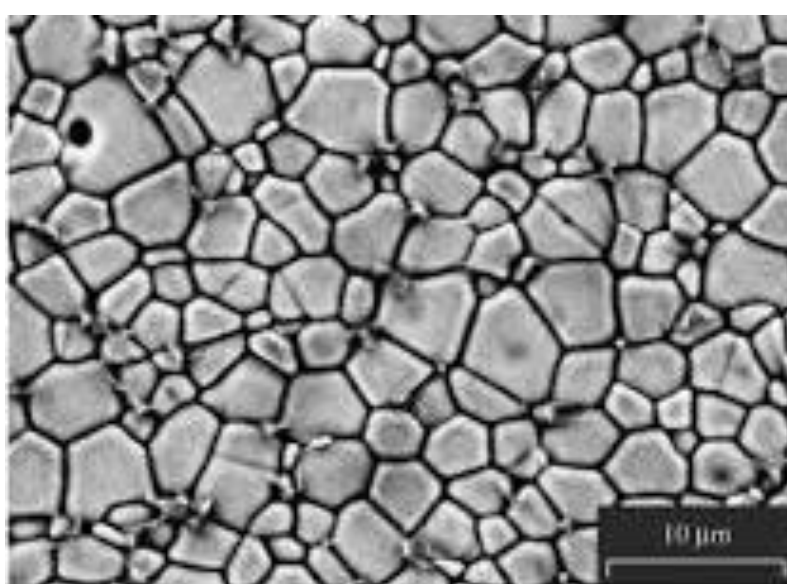
***г***



*e*



*ж*



*з*

## Оглавление

Лабораторная работа 1Д. Материалы подложек для гибридных интегральных схем .....	3
Лабораторная работа 2Д. Определение размеров зерен в поликристаллах .....	10
Приложение.....	17

=====

Учебное издание

## Материалы электронной техники

Практикум

Составители

**Зимин Сергей Павлович**

**Горлачев Егор Сергеевич**

Редактор, корректор М. Э. Левакова

Верстка М. Э. Леваковой

Подписано в печать .04.2019. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л.1,1.

Тираж 4 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен

в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова.

150003, Ярославль, ул. Советская, 14.