

Оглавление

1. Введение.
2. Общие сведения о диффузии по границам зерен.
3. Краткое рассмотрение метода теоретического расчета диффузии для случая В по классификации Фишера.
4. Общие сведения об определении профиля концентрации методом радиоактивных индикаторов.
5. Метод удаления микрослоев путем распыления Ar.
(с описанием установки.)
6. Данные (практические) исследования профилей концентрации методом радиоактивных индикаторов.
7. Список литературы.
8. Оглавление.

В данной работе кратко рассмотрена механическая диффузия в слоях тонких пленок . Приведена основная классификация диффузии в тонких пленках (по Фишеру). Кратко рассмотрен математический вывод нахождения концентрации диффундирующих веществ в случае В по Фишеру . Приведен практический метод исследования профилей концентрации на конкретной установке и также приведен профиль диффузии ^{195}Au в поликристаллическом образце Au.

1. ВВЕДЕНИЕ.

Тонкие пленки играют очень важную роль в современной технике. Особенно успешно они применяются в быстро развивающейся технологии интегральных схем. Они служат также основными элементами в столь различных областях техники, как устройства для преобразования солнечной энергии в электрическую энергию, и сверхпроводниковые приборы. Важное требование к тонкопленочным структурам в этих применениях состоит в том, чтобы они сохраняли свое строение. В структурах на основе массивных объектов или толстых слоев взаимодиффузию и реакции на расстояние $\sim 100\text{Å}$ обычно можно не принимать во внимание. В случае же тонкопленочных структур могут протекать резко выраженные реакции даже при комнатной температуре. Причем только недавно были созданы экспериментальные методы, позволяющие изучать эффекты переноса вещества в столь малых пространственных масштабах. Основная цель доклада рассмотреть диффузионные явления в тонких пленках, а также современные методы их исследования. Основные трудности анализа возникают, когда толщина пленки лежит в интервале от ~ 10 до нескольких микрометров.

Совершенно очевидно, что исследование реакций в тонких пленках по большей части стимулируются требованиями технологии. Эти требования могут возрастать по мере усиления ограничений, накладываемых на материал и размер пленок. В самом деле в области интегральных схем мы подходим к рубежу, когда пленки по своим размерам будут близки к атомным расстояниям.

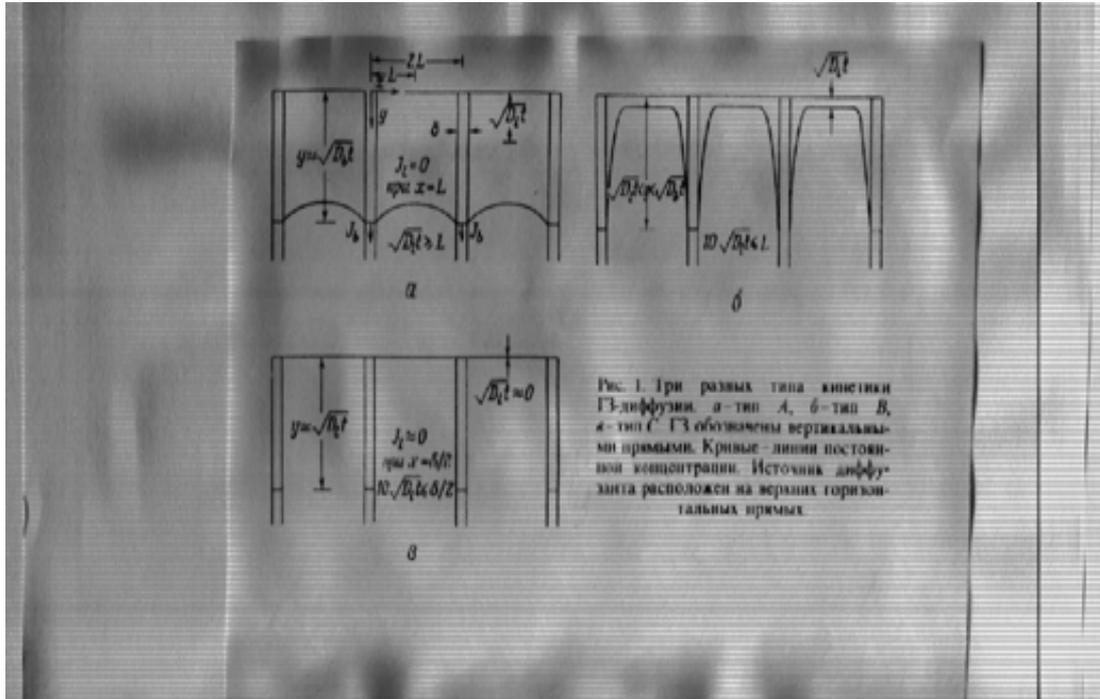
Общие сведения о диффузии по границам зерен .

Под диффузией по ГЗ буквально можно понимать движение атомов, происходящие в области границы раздела между двумя зернами.

В теории диффузии многие исследователи считают эту область , в которой скорость диффузии велика почти двухмерной , с границей порядка межатомного расстояния . Однако в более широком смысле диффузии по ГЗ – это такой процесс , когда диффузия по границам происходит совместно с решеточной диффузией . Диффузия по кристаллической решетке необходима для определения экспериментального профиля концентрации при исследовании ГЗ-диффузии . Дело в том , что число атомов диффузианта , находящегося непосредственно на ГЗ , обычно очень мало и его невозможно обнаружить , а потому измеряется концентрация таких атомов , диффундирующих по кристаллической решетке от границы в объем зерен.

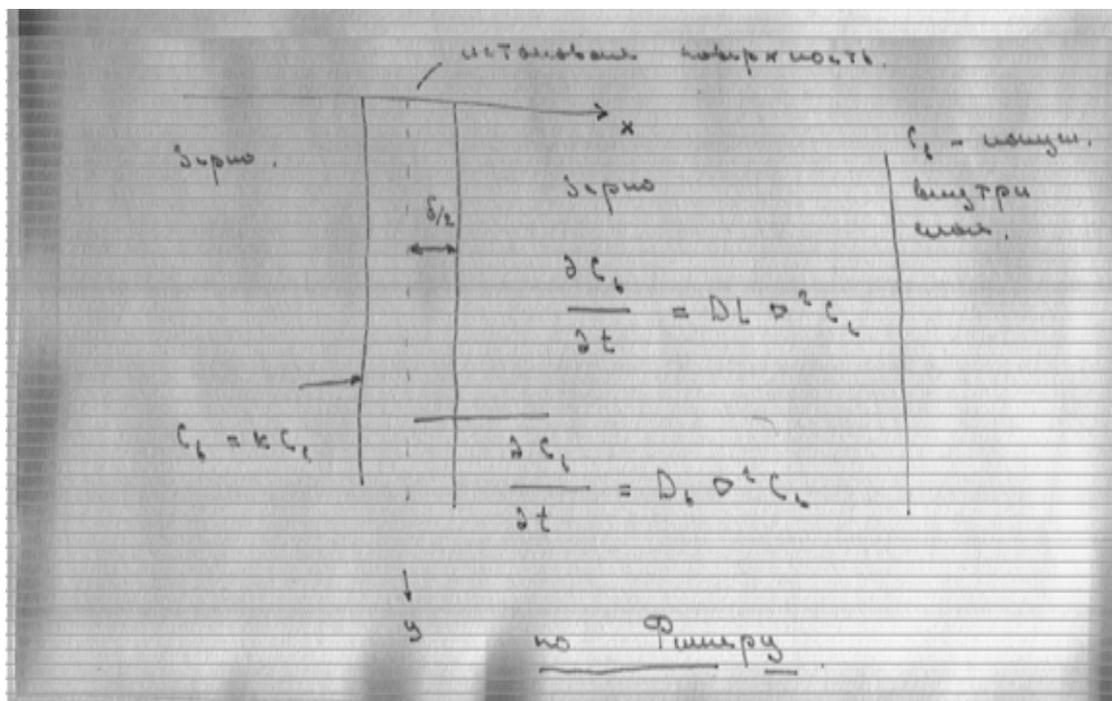
Степень влияния диффузии по кристаллической решетке на движение вещества вдоль ГЗ определяется режимом кинетики , который преобладает в данных условиях . Следуя Харрисону , мы будем различать три типа кинетики : А , В , С . Отличительной особенностью кинетики типа А является сильная диффузия по кристаллической решетке , которая приводит к перекрыванию диффузионных полей соседних зерен . Границы зерен показаны как вертикальные полосы , отстоящие друг от друга на расстояние $2L$. В расчетах боковой диффузионный поток I_x принимают равным нулю посередине между границами при $x=L$. В случае В : ГЗ считают изолированными и боковой поток принимают равным нулю уже на сравнительно малых расстояниях от границ . В случае кинетики типа С диффузия по кристаллической решетке совсем незначительна и движение атомов происходит только внутри самих ГЗ . При измерении ГЗ-диффузии в массивных образцах всегда исходят из кинетики типа В . Эксперименты по определению профилей концентраций в массивных образцах пока дали мало прямых указаний на существование кинетики типа А и С . С этой точки зрения большой интерес представляют исследования диффузии в тонких пленках , поскольку очень большая плотность дефектов позволяет наблюдать в них при условии определенного типа отжига любой из трех типов кинетики .

Рис 1.



Кратко рассмотрим метод теоретического расчета диффузии для кинетики типа В.

В данном случае имеем конечный образец типа В. Давно установлено, что скорость диффузии в тонких пленках выше, чем в массивных образцах. Увеличение скорости диффузии обусловлено двумя очевидными причинами: уменьшением длины диффузии, увеличением плотности путей пролегающих по ГЗ. Будем рассматривать случай диффузии очень малых примесей в тонких пленках, состоящих из столбчатых зерен.



Общее уравнение диффузии имеет такой вид :

Δ - здесь и далее оператор Набла

δ - здесь и далее знак дифференциала

$$D_1 * \Delta^2 * C_1 = \frac{\delta C_1}{\delta t} \quad - \text{вне границы зерна}$$

$$D_b * \Delta^2 * C_b = \frac{\delta C_b}{\delta t} \quad - \text{внутри зерна}$$

C_1 – концентрация в кристаллической решетке.

C_b – концентрация в границе зерна.

$$\left(\frac{\delta C_1}{\delta y} \right)_{y := 1} = 0 \quad - \text{условие полного отражения примеси}$$

от тыльной стороны поверхности пленки

C_1 – концентрация в кристаллической решетке , обусловленная обычной плоской диффузией по решетке .

C_2 – концентрация в решетке , обусловленная диффузией из ГЗ .

$$C_1 = C_1 + C_2/d$$

D – коэффициент диффузии .

~~~~~

В нашем случае можно дать такое описание модели .

$$C(x, 0, t) = C_0$$

$$\frac{\delta C(x, l, t)}{\delta y} = 0$$

$$C_1 = 1 - \frac{4}{\pi} \left[ \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{2 \cdot m - 1} \cdot \sin[\mu_{(2m-1)}] \cdot \exp[-(\mu_{2m-1})^2] \right] \right]$$

$$C_2 = \frac{2 C_0}{\lambda_0} \cdot \int_1^{\Delta} 1 d\phi \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\mu_{2m-1} \cdot \lambda)$$

\*

$$\left[ [(\mu_{2m-1})^2 \cdot \phi - 1] \cdot \mu_{2m-1} \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{1}{2} \cdot \operatorname{sqrt} \left( \frac{\Delta - 1}{\Delta - \phi} \right) \right) \cdot \left( \xi + \frac{\phi - 1}{k \cdot \beta} \right) \right]$$

Величина  $\lambda_0$  определяется выражением

$$\lambda_0 = \frac{1}{\operatorname{sqrt}(D_1 \cdot t)}, \text{ а величина}$$

$$\mu_{2m-1} = \frac{(2m-1) \cdot \pi}{2 \cdot \lambda_0}$$

Усредненная по сечению отдельного зерна концентрация диффундирующего вещества, которую в дальнейшем для краткости будем называть интегралом по сечению, дается выражением:

$$\frac{1}{d} \cdot \overrightarrow{C_2} = \frac{8 \cdot \sqrt{D_1 \cdot t \cdot C_0}}{d \cdot \lambda_0} \cdot \int_1^{\Delta} 1 \, d\phi \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \sin(\mu_{2m-1} \cdot \lambda)$$

\*

$$\exp(-\sqrt{\mu_{2m-1} \cdot \phi}) \cdot \sqrt{\frac{\Delta - \phi}{\Delta - 1}} \cdot \left( \frac{\exp(-x^2)}{\sqrt{\pi}} - x \cdot \operatorname{erfc}(x) \right) \cdot \mu_{2m-1}$$

Экспериментально измеряемый профиль, определяется суммой величин

$$\overrightarrow{C_1 + C_2}$$

в силу уравнения:

$$C_1 = C_1 + \frac{\overrightarrow{C_2}}{d}$$

Теоретический профиль концентрации дан ниже на рисунке:

Рис 2.

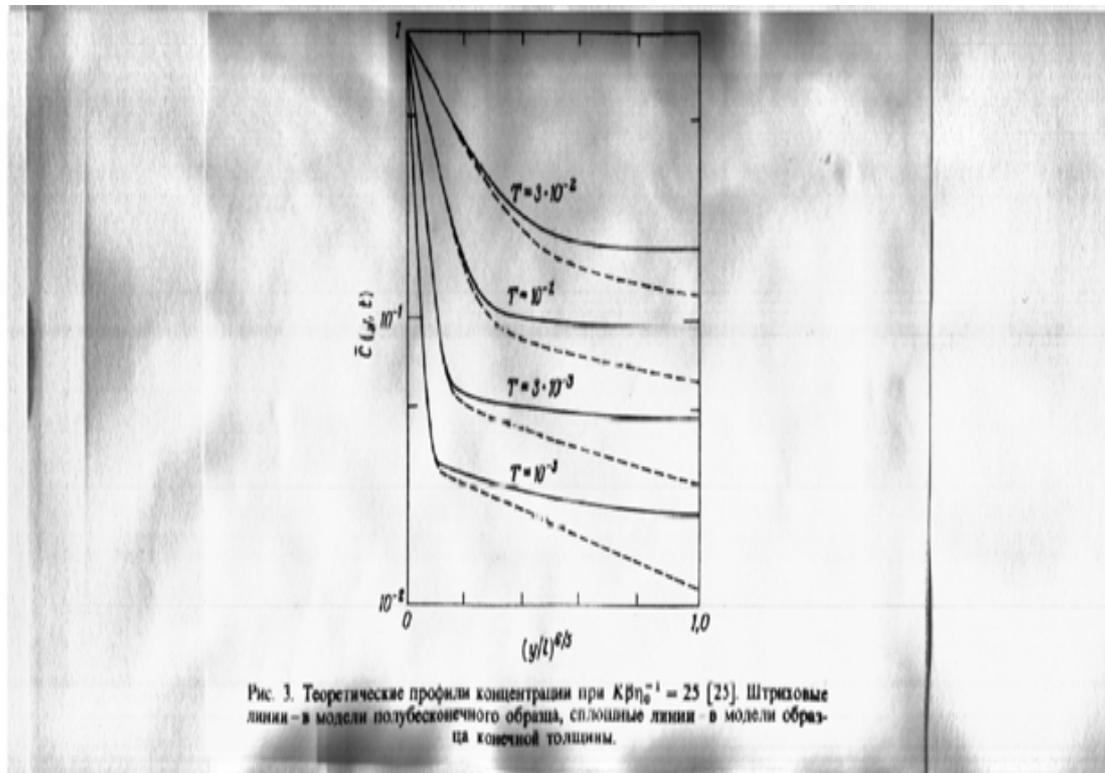


Рис. 3. Теоретические профили концентрации при  $K\beta\eta_0^{-1} = 25$  [25]. Штриховые линии – в модели полубесконечного образца, сплошные линии – в модели образца конечной толщины.

## **Общие сведения о определении профиля концентрации методом радиоактивных индикаторов .**

Одна из методик исследования ГЗ диффузии основана на определении профиля концентрации диффузианта методом радиоактивных индикаторов . Такой метод позволяет с высокой точностью прямым путем измерять истинное распределение диффундирующего вещества обычно не превышает 1 мкм , и следовательно , химический состав и степень чистоты остаются неизменными с точностью до  $10^{-4}\%$  .

При измерении профиля концентрации радиоактивного изотопа в пленках , требуется снимать слои толщиной менее 1 мкм , поскольку толщина всей пленки измеряется микрометрами , а глубина диффузии еще меньше . Значит чисто-механические средства здесь невозможны . Поэтому используют метод электрохимического послойного травления и метод удаления микрослоев путем распыления ионами . Рассмотрим второй метод .

## Метод удаления микрослоев путем распыления ионами Ag .

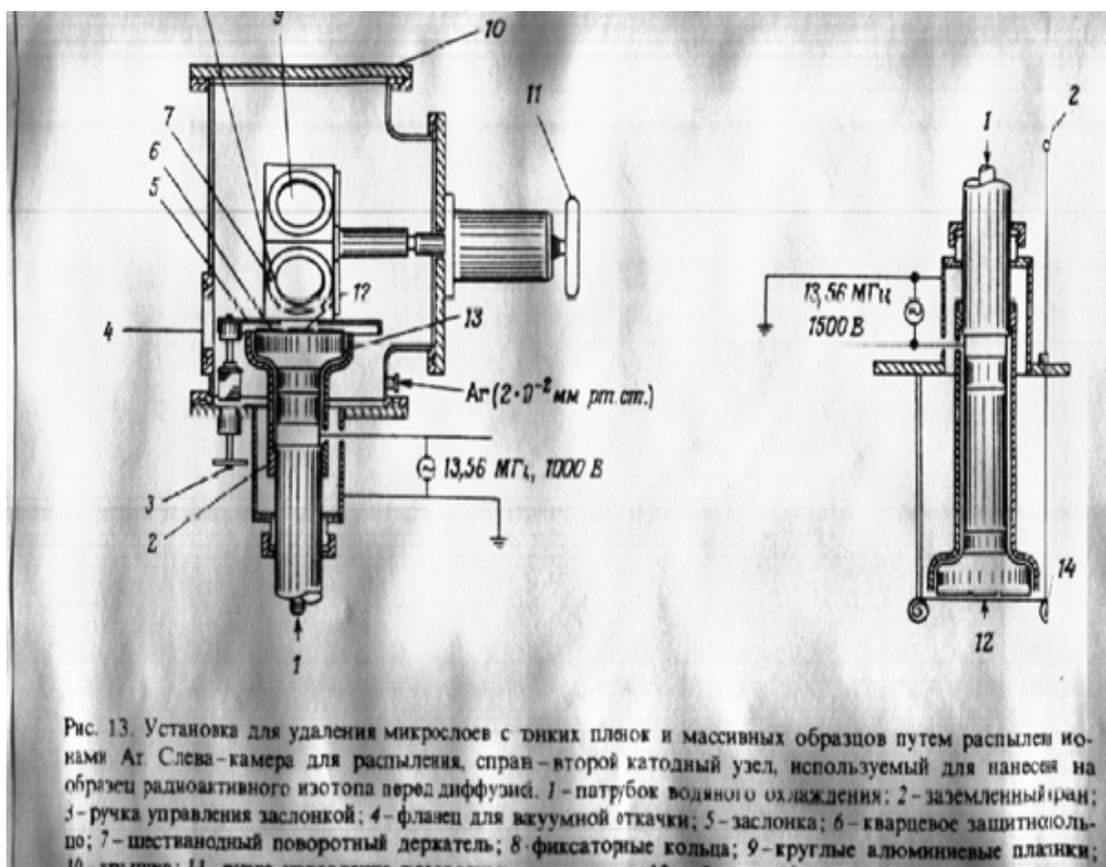
Установка для удаления микрослоев путем распыления ионами Ag в плазме ВЧ-разряда была разработана в лаборатории фирмы IBM , а затем такие установки применялись в целом ряде различных ситуаций . Схема установки представлена на рисунке ниже. Камера с образцом , подвергшемся диффузии , откачивается до давления  $10^{-7}$  мм.рт.ст. Последовательное удаление слоев исследуемого образца , параллельных плоскости диффузии , достигается за счет распыления вещества ионами Ag в плазме ВЧ-разряда , возникающего при подаче на образец ВЧ напряжения с двойной амплитудой 1000В и частотой 13.56 МГц. Чтобы уменьшить ориентированно-зависимое распыление и преимущественное травление зерен , эффективную мощность разряда поддерживают так , чтобы она не превышала  $\sim 0.4$  Вт. на  $1 \text{ см}^2$  площади катода . Распыляемое вещество образца осаждают на круглых алюминиевых пластинках . Для ускорения процедуры предусматриваются поворотные многоанодные держатели , которые позволяют за одну откачку камеры снять шесть последовательных слоев . Главное условие ровного удаления вещества – это стабильность источника ВЧ-мощности и газового потока Ag . Для этого ВЧ-напряжение стабилизируют с точностью до 1% при помощи электронного стабилизатора , а давление Ag поддерживают на уровне  $20(+1) \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст. при помощи регулятора с претензионным натекателем . Очень важное значение имеет также контроль за геометрией образца в процессе распыления . Для большинства металлов достигается скорость распыления  $\sim 1 \text{ \AA} \cdot \text{с}^{-1}$  . Следовательно , изменением длительности распыления одного слоя от 30 сек. до нескольких минут, можно с высокой точностью измерять профиль концентрации радиоактивного изотопа шагами по 30 А . Толщина слоев определяется путем последовательного взвешивания на весах . По полному уменьшению массы образца между откачками камеры вычисляют глубину проникновения диффузианта . Важной особенностью описанной установки для ионного распыления является то , что на ней можно наносить на исследуемый образец радиоактивный изотоп . При этом можно предварительно очистить поверхность образца , особенно

от окисной пленки, а затем не подогревая и не нарушая вакуума нанести на него радиоактивный изотоп.

При этом нужно предварительно очистить образец и нанести на него изотоп не нарушая вакуума.

Схема такой установки приведена на рисунке 3.

Рис 3. Установка для удаления микрослоев тонких пленок путем распыления ионами Ar.



## Данные исследования профилей концентрации методом радиоактивных индикаторов .

На рисунке представлены типичные профили диффузии радиоактивного изотопа в поликристаллическом образце Au . Этот образец содержит зерна с большеугловыми ГЗ и малые зерна с диаметром  $\sim 5$  мкм. с малоугловыми границами . Следовательно , рассмотрение радиоактивного изотопа в этом случае должно определяться сначала диффузией по кристаллической решетке , а затем диффузией по субзернам и потом ГЗ-диффузией . Эти области обозначены на рисунке как 1 , 11 , 111.

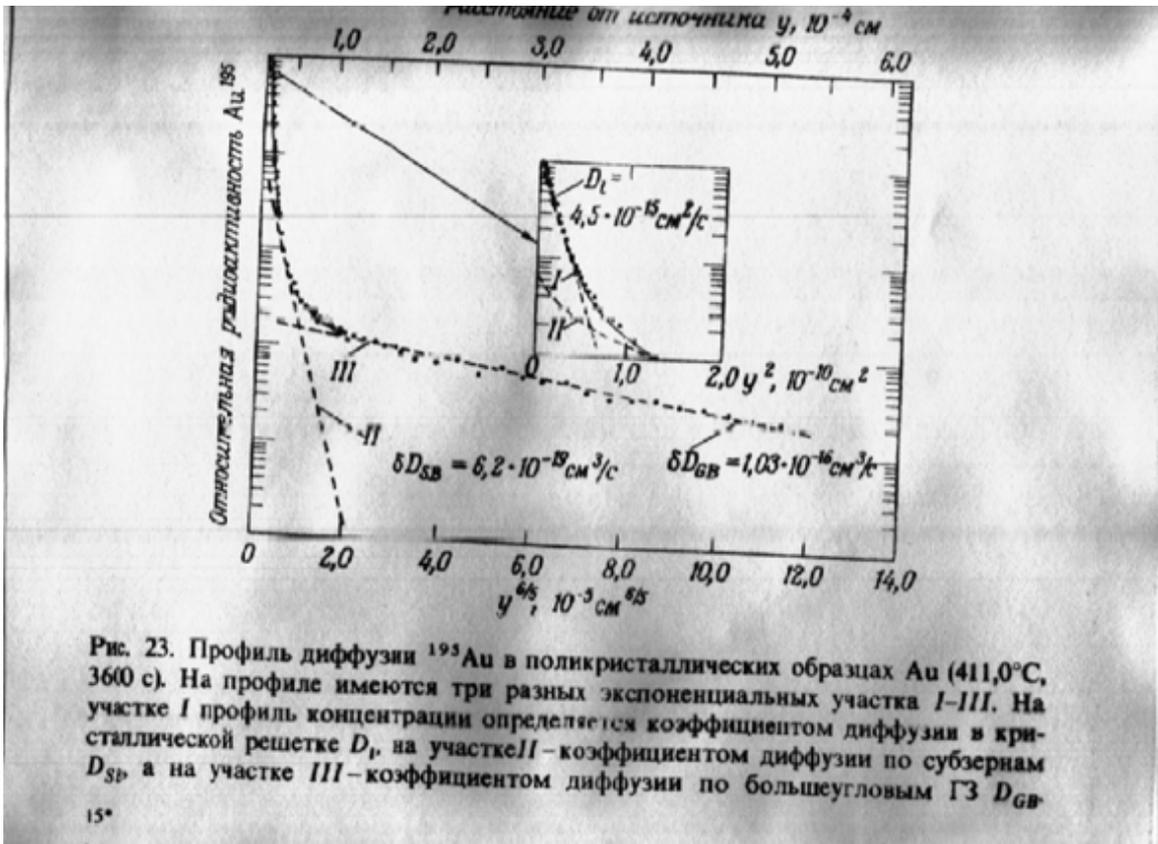
Если в условиях эксперимента диффузионная длина окажется значительно меньше диаметров зерен и субзерен , и в таких условиях , что реализуется кинетика В , то оказывается возможным вычислить коэффициенты диффузии по всем трем процессам . Длина диффузии по кристаллической решетке поддерживается в этих экспериментах в интервале от 100А до 1000А . Эти значения намного меньше диаметра субзерен (  $\sim 5$  мкм. ) . Кроме того , условием отжига обеспечивалось существенное отличие диффузионных длин в субзернах и ГЗ от диффузионной длины в решетке . Благодаря этому профиль диффузии можно путем подгонки кривых разделить на три участка , на которых концентрация изменяется как  $y^2$  ,  $y^{6/5}$  – где  $y$  глубина . Выбор степени в каждом случае определяется гауссовой формой профиля диффузии радиоактивных атомов в кристаллической решетке , и формой решения Уипла-Сузуки , описывающих перенос вещества . Таким образом , профили в поликристаллических массивных образцах Au описывается выражением :

$$C = p \cdot \exp(-P \cdot y^2) + m \cdot \exp\left(-M \cdot y^{\frac{6}{5}}\right) + n \cdot \exp\left(-N \cdot y^{\frac{6}{5}}\right)$$

Где  $C$  – концентрация атомов на расстояние  $y$  от поверхности истока , а  $p$  ,  $m$  ,  $n$  и  $P$  ,  $M$  ,  $N$  – коэффициенты экспоненциальных зависимостей . Коэффициентом  $P$  определяется величина  $D_1$  ( $P=1/4D_1t$ ) , а коэффициенты  $M$  и  $N$  в соответствии с решением Уипла-Сузуки для долгого по времени источника определяются коэффициенты диффузии по ГЗ или по субзернам . При больших  $b$  в числе веществе коэффициент диффузии по дефектам определяется формулой :

$$\delta D_b = 0.661 \cdot \left( \frac{\delta \ln C_b}{\delta y^{\frac{6}{5}}} \right)^{\frac{-5}{3}} \cdot \left[ \left( 4 \frac{D_1}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$$

Здесь индекс  $b$  соответствует коэффициенту диффузии либо по субзернам, либо по ГЗ в зависимости от того, какая величина,  $M$  или  $N$ , определяется вторым членом в выражении предыдущем. Все эти формулы справедливы для кинетики типа В.



## **Список литературы :**

- 1 Дж. Поут.  
Тонкие пленки .Взаимная диффузия и реакции .
- 2 К. Л. Чопра.  
Электрические явления в тонких пленках .
- 3 В. М. Глазов .  
Технология интегральных микросхем.
4. А. С. Палатин .  
Основы пленочного полупроводникового материаловедения .
6.  
Поверхность . ( журнал 1,9,12-1998 , 7-1995)

**МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ  
ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ .  
( технический университет )**

**Факультет Электроники .**

**КУРСОВАЯ РАБОТА.**

**ТЕМА :**

*“ Диффузионные процессы в тонких слоях  
пленок при изготовлении Б.И.С. методом  
толстопленочной технологии .”*

**Студент : Бычковский Я.С.  
Преподаватель : Мухин А.А.**

**2001**