

А. В. СТЕРХОВА, к. т. н. П. А. УШАКОВ,  
к. т. н. П. Н. ЖАРКОВ

Россия, Ижевский гос. технический ун-т, Ижевский механический з-д  
E-mail: offise139@baikal.nc.ru

Дата поступления в редакцию  
20.07 2000 г.

Оппонент к. ф.-м. н. А. И. ЗУДОВ

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНОЙ И КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛЕЙ ТОЛСТЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ПЛЕНОК

*Разработаны методы построения структурной и кластерной моделей и определения основных параметров микроструктуры толстых пленок.*

Известно, что резисторы первых толстопленочных микросхем были выполнены на основе серебропалладиевых паст. Несмотря на большое количество новых резистивных материалов, эти пасты по-прежнему находят широкое применение, особенно при изготовлении высоконадежных и стабильных ГИМС [1].

По структуре все резистивные материалы обычно относятся к гетерогенным многокомпонентным системам. Вместе с тем из-за сложности технологических процессов и многокомпонентности исходного состава имеющиеся данные носят неоднозначный, порой противоречивый характер [2, с. 141–159]. В ряде публикаций [3–6] модели структуры строятся исходя не из реальных параметров пленки, а гипотетически, в предположении определенного типа электропроводности. При этом чаще всего принято считать, что микроструктура стекла представляет собой непрерывно-сетчатую матрицу из стеклообразующих окислов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{PbO}$ ), в которой в процессе высокотемпературного отжига частицы мелкодисперсного порошка функционального наполнителя (серебра, палладия, индия) распределены равномерно или квазиравномерно [3, 7].

В данной работе рассмотрен подход к формированию структурной и кластерной моделей толстой серебропалладиевой резистивной пленки с использованием электронной Оже-спектроскопии и опробована методика оценки параметров микроструктуры — таких как размеры гранул проводящей фазы пленки, расстояния между частицами и другие.

Объектом моделирования служила резистивная пленка толщиной 25 мкм, изготовленная по стандартной толстопленочной технологии вжигания серебропалладиевой пасты на основе свинцовоборосиликатного стекла марки 660а.

На **рис. 1** представлена микрофотография поверхности реальной структуры скола толстопленочного резистора, полученная во вторичных электронах на Оже-спектрометре «Джамп-10С». На ней хорошо различимы черные и белые участки на сером



Рис. 1. Микрофотография поверхности излома пленки толстопленочного резистора

фоне, среди которых более крупные по размерам области, как правило, имеют произвольную форму, в то время как сферическая форма присуща преимущественно частицам малых размеров.

Однако построение физической модели структуры пленки, адекватной исследуемому объекту, непосредственно по микрофотографии не представлялось возможным без многократного дополнительного увеличения и выделения характерных областей исследуемой поверхности и, кроме того, необходимо было соотнести их с элементным составом пленки. Были использованы два способа компьютерной обработки. На **рис. 2, а** дан вид исследуемой поверхности излома после компьютерного преобразования изображения с резким выделением контура границ характерных черных участков. Фрагмент общего вида изображения после пятикратной градации по степени почернения представлен на **рис. 2, б**. Это сделало возможным зафиксировать их форму и координаты расположения участков в плоскости с достаточно большой точностью, однозначно и достоверно, что максимально приблизило создаваемую модель к реальному объекту.

Поэлементный анализ характерных участков поверхности образца (черных, белых и серого фона) в силу их малого размера (доли микрометра) был выполнен методом электронной Оже-спектроскопии, обладающим высокой степенью локальности электронного Оже-зонда. Регистрация Оже-спектров проводилась в диапазоне энергий 60–600 эВ.

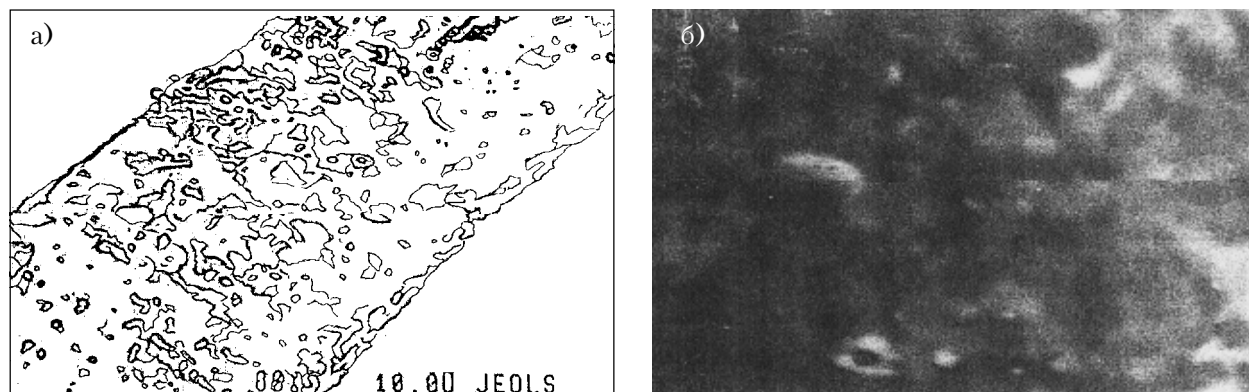


Рис. 2. Излом пленки: *a* — общий вид, полученный в режиме выделения контуров; *б* — фрагмент изображения при пятикратной градации по степени почернения

Из анализа Оже-спектров следует, что спектр произвольно выбранного черного участка содержит достаточно интенсивные линии серебра, окиси палладия и окиси индия с энергиями связи ( $E_{св}$ ) соответственно 356, 328 и 406 эВ, поэтому он был отнесен к областям с металлическим и полупроводниковым характером электропроводности.

Оже-спектр белого участка преимущественно состоит из хорошо выраженного пика окиси кремния ( $E_{св}=78$  эВ) и меньшего по интенсивности пика окиси свинца ( $E_{св}=99$  эВ). Металлическая компонента в этом спектре практически не наблюдается, поэтому белая область идентифицировалась как непроводящая область саинцово-боросиликатного стекла.

Интересным представляется Оже-спектр межгранулярной прослойки серого фона. Наличие в указанной области и диэлектрической, и проводящей фаз может быть обусловлено диффузией металла в стекло [6] в процессе высокотемпературного отжига (605°C) резистивной пасты, в исходный момент состоящей из механической смеси мелкодисперсного порошка проводящей фазы и частиц стекла (размеры частиц исходных материалов 0,1 — 0,5 и 1 — 5 мкм, соответственно) при хорошей смачиваемости частиц расплавленным стеклом.

Таким образом, идентификация характерных участков по критерию содержания проводящей и диэлектрических фаз позволяет построить физическую модель структуры толстой пленки при следующих представлениях: черные участки соответствуют металлическим зернам проводящей фазы, светлые области соотносятся с непроводящей диэлектрической фазой стекла, а межгранулярные прослойки между ними можно охарактеризовать как "плохой" диэлектрик с различной степенью легирования стекла проводящей фазой (более вероятно, серебром).

Кластерная модель макросвязей пленки исследуемого резистора дана на **рис. 3**. Физическая структурная модель представлена на **рис. 4**. Обе модели, в силу достаточно большой выборки, обеспечивают статистическую обработку результатов измерения параметров структуры.

Формализация идентифицированных выше элементов структуры была проведена при следующих допущениях: контуры черных участков на рис. 3 заполнены со-

прикасающимися зернами сферической формы разного диаметра; диэлектрические (белые) области оставлены исходной (неправильной) формы (на рисунке заштрихованы); серый фон межгранулярных прослоек условно не показан.

Правомерность принятых допущений вытекает из реального процесса спекания ТПР, когда крупные частицы расплавленной фритты заставляют частицы мелкодисперсного порошка (доли микрометра) структурироваться, то есть сближаться в объеме расплавленной массы, образуя более крупные кристаллиты вплоть до "комков".

В физической структурной модели оценке подлежали диаметр, периметр и площадь проводящих зерен в гранулах ( $d$ ,  $P$  и  $S$ , соответственно), суммарная площадь частиц стекла ( $S_c$ ), длина проводящих цепочек ( $l$ ), их форма, пространственная ориентация и плотность распределения. В верхнем углу рис. 3 представлена типичная интегральная функция распределения диаметров проводящих зерен  $F(d)$  с оценкой средней статистической величины диаметра проводящего зерна с погрешностью ( $d \pm \sigma$ ) соответственно на уровнях 0,5 и 0,84  $F(d)$  ( $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение). В **табл. 1** сведены значения диаметра, периметра и площади зерен трех фрагментов (1, 2, 3) и полной (4) выборки.

Как следует из рис. 3 и **табл. 1**, наблюдается одномодальный характер распределения диаметров металлических зерен со средней величиной 0,3 мкм

Таблица 1

Параметры проводящих зерен

Номер фрагмента	$d$ , мкм	Выборка, шт.	$P$ , мкм	$S$ , мкм <sup>2</sup>
1	0,28±0,22	158	0,88±0,69	0,061±0,048
2	0,28±0,17	119	0,88±0,53	0,061±0,037
3	0,28±0,17	53	0,88±0,53	0,061±1,037
4	0,28±0,22	330	0,88±0,69	0,061±0,0148

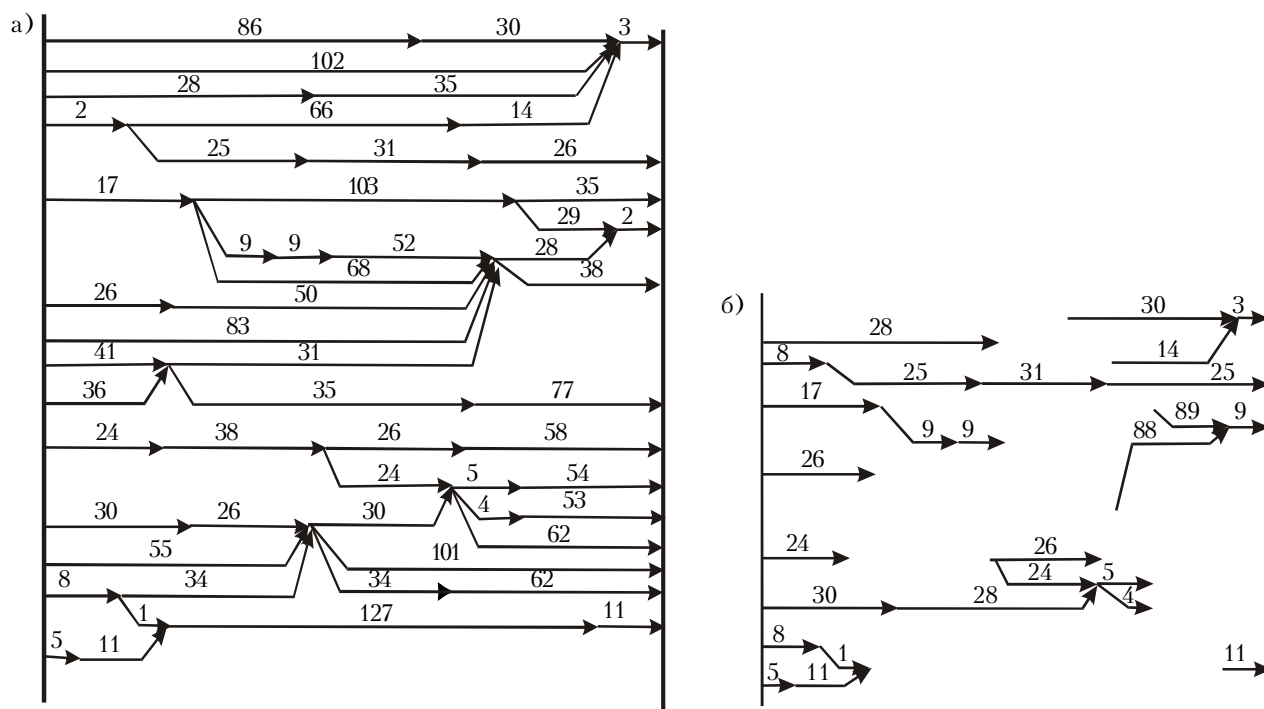


Рис. 3. Кластерная модель пленки резистора:  
 а – полная модель; б – модель с последней замкнутой макросвязью ( $l=31$ )

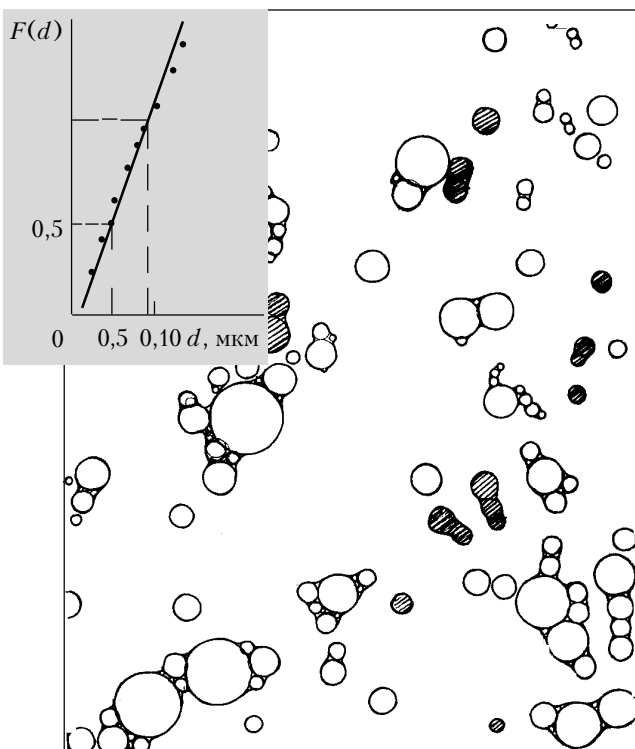


Рис. 4. Физическая структурная модель пленки резистора

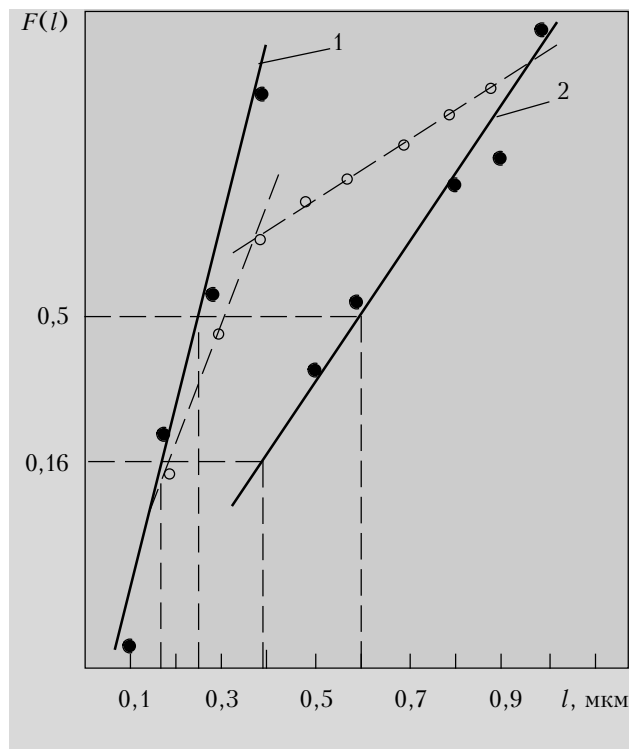


Рис. 5. Распределение длины проводящих цепочек ( $l$ )

при максимальной величине зерна в грануле ( $d+3\sigma$ ) до 1 мкм, что хорошо согласуется с литературными данными [3, с. 141]. Общая площадь диэлектрической (заштрихованной на модели) области составляла не более 1,0 – 1,2% всей площади фрагмента.

На рис. 5 пунктирной линией представлено типичное распределение длины проводящих цепочек  $F(l)$  для полной выборки. В отличие от функции  $F(d)$ , оно носит бимодальный характер, поэтому общая выборка была разбита на две (1 и 2), каждая из которых представлена своей сплошной линией. В понятие «цепочки» входили как отдельные сферические частицы, так и контактирующие между собой. Для первой выборки математическое ожидание длины цепочки составило в среднем 0,3 мкм, что совпало с диаметром одиночной частицы. Для второй выборки средняя длина цепочки была примерно в три раза больше. Максимальная величина единичных цепочек была порядка 10 мкм. Длина цепочек оценивалась как по длинной стороне физической модели (фрагменты 1 и 3 в табл. 2), так и по короткой (фрагменты 2 и 4).

Для сравнения: размеры резистора составляли от 0,5×0,5 мм до 3×3 мм при толщине пленки 20 – 25 мкм. Таким образом, цепочек, напрямую соединя-

ющих внешние контактные площадки резистора, не наблюдалось. По форме цепочки были как удлиненной формы, так и в виде "комков", хотя малые размеры дают основание утверждать, что настоящего "комкования" в процессе спекания не наблюдается.

Топологическая картина полной кластерной модели толстопленочного резистора, приведенная на рис. 4, а, состоит из множества макросвязей ( $L$ ), проведенных между внешними контактами через гранулы проводящей фазы и построенных по методу «лучей и теней» теории графов [8, с. 126]. При этом гранулы проводящей фазы стянуты в точки (указано стрелками), а их размер учтен в длине каждой макросвязи, которые на рис. 4, а даны в условных единицах над каждой линией (1 у. е.=0,0555 мкм). Плотность макросвязей в кластере определена плотностью расположения проводящих гранул.

По теории прыжковой электропроводности, осуществляемой через диэлектрические прослойки, не все макросвязи, условно проведенные от одного внешнего контакта к другому, являются линиями тока. Задача в данном случае сводится к тому, что в кластере разрывают одну за другой макросвязи, начиная с максимальной, до тех пор, пока не останется единственная замкнутая линия, как показано на рис. 4, б. Разорванные линии макросвязей образуют "мертвые" концы, по которым ток не течет.

Интегральная функция распределения длины межгранулярных прослоек  $F(L)$  имеет, аналогично рис. 5, также бимодальный характер. Экспериментальные и расчетные значения сведены в табл. 3 соответственно для первой и второй выборки каждого фрагмента (здесь  $L_{\max} = \bar{L} + 3\sigma$ ,  $\Delta L = \bar{L} - L_{\text{эксп}}$ ).

Следует отметить, что кластерная модель строилась как по узкой, так и по широкой сторонам фрагментов. Во всех случаях выявлена общая закономерность, состоящая в том, что максимальная длина  $L_{\max}$  второй выборки фактически определяла момент появления первого "мертвого" конца в полной кластерной модели ( $L_{\text{эксп1}} = 127$  у. е.), а теоретическое значение максимальной длины  $L_{\max}$  первой выборки совпадало с экспериментальным значением максимальной длины макросвязи в последней замкнутой цепи ( $L_{\text{эксп1}} = 31$  у. е.). Точность такого совпадения, оцененного как отношение ( $\Delta L / \bar{L}$ , %), была достаточно высока.

В то же время бимодальность закона распределения вполне справедлива с физической точки зрения – исходя из предположения о наличии туннельно-барьерного механизма электропроводности на-

ряду с активационным механизмом, каждый из которых обусловлен своим диапазоном межгранулярной прослойки между зернами.

Представлялось интересным провести сравнение полученных нами на реальной структуре пленки статистических распределений по данной методике с наиболее распространенным [7; 9, с. 26 – 31] равномерным распределением зерен проводящей фазы в стеклянной фритте. Для этого было проведено компьютерное моделирование распределения полной

Таблица 2

Длина проводящих цепочек

Номер фрагмента	Номер выборки	Выборка, шт.	$\bar{l} + \sigma$	$l_{\max} = \bar{l} + 3\sigma$
1	1	39	0,39±0,18	0,93
	2	22	0,86±0,55	2,51
2	1	32	0,32±0,12	0,68
	2	9	0,98±0,25	1,73
3	1	22	0,27±0,09	0,54
	2	40	0,70±0,28	1,54
4	1	33	0,28±0,08	0,52
	2	13	0,67±0,22	1,33
Вся картина	1	126	0,32±0,12	0,68
	2	77	0,82±0,33	1,82

Таблица 3

Межгранулярное расстояние

Номер фрагмента	Номер выборки	Выборка, шт.	$\bar{L} + \sigma$	$L_{\max}$	$L_{\text{эксп}}$	$\Delta L / \bar{L}$ , %
1	1	38	0,47±0,39	1,63	2,16	+33,1
	2	29	2,41±0,58	4,16	4,88	+17,3
2	1	43	0,64±0,47	2,05	2,11	+3,0
	2	28	2,77±1,00	5,77	5,88	+1,9
3	1	38	0,44±0,27	1,26	1,44	+14,3
	2	47	2,28±1,06	5,45	5,38	-1,3
4	1	27	0,39±0,50	1,89	1,72	-8,9
	2	46	2,05±1,11	5,37	4,77	-11,3

выборки зерен проводящей фазы, полученной из массива рис. 3, следуя случайному и равномерному закону распределения и последующему построению кластерной модели. Статистическая обработка экспериментальных данных показала, что основным отличием от распределения полной выборки, представленного на рис. 5 (пунктирная линия), является отсутствие бимодального характера закона распределения контролируемых параметров толсто пленочных резисторов.

\*\*\*

Таким образом, применение современных средств компьютерной обработки изображения позволило создать физическую структурную и кластерную модели толстой резистивной пленки с учетом как топологических, так и метрических характеристик.

Использование Оже-метода сделало возможным идентифицировать характерные участки микроструктуры ТПР по элементному составу с высокой степенью локальности и достоверности.

Впервые выявлен бимодальный характер распределения длины проводящих цепочек и длины макро-связей между гранулами проводящей фазы, полученной по кластерной модели, что является необходимым для оценки ширины потенциального барьера при проявлении тунельно-барьерного механизма и оценки расстояния между локализованными состояниями для термоактивационного механизма.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Применение благородных металлов в микроэлектронике // Зарубежная электронная техника. — 1992. — № 5—6. — С. 27.
2. Мартюшов К. И., Зайцев Ю. В. Технология производства резисторов. — М.: Высшая школа, 1972.
3. Ansell M. P. Conduction processes in thick film resistors // Electrocomponent Science and Technology. — 1976. — Vol. 3, N 3. — P. 131—151.
4. Pike G., Seager C. Electrical properties and conduction mechanisms of Ru-based thick-film (cermet) resistors // Appl. Phys. — 1977. — Vol. 48. — P. 5152—5169.
5. Coleman M. Thick film materials for hybrids // The Radio and Electronic engineers. — 1982. — Vol. 52, N 5. — P. 227—234.
6. Cattaneo A., Cosito N., Forlani P., Prudenziati M. Influence of the metal migration from screen-and-fired termination on the electrical characteristics of thick-film resistors // Electrocomponent Science and Technology. — 1977. — Vol. 4, N 3—4. — P. 205—210.
7. Бирин Г. А., Шапиро Н. И., Байкова Е. М., Селицкая Н. М. Разработка составов и технологии формирования свойств металлостеклянных толсто пленочных резисторов с помощью методов математической теории эксперимента // Электронная техника. — Сер. Радиодетали и радиокомпоненты. — 1978. — Вып. 2. — С. 39—46.
8. Абрайтис Л. Б. Автоматизация проектирования топологии цифровых интегральных микросхем. — М.: Радио и связь, 1985.
9. Мартюшов К. И. Проблемы резисторного материаловедения. — М.: Высшая школа, 1985.

**Массовый периодический научно-технический журнал**  
**"ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И СИСТЕМЫ"**  
 Издается с 1996 г.

Подписной индекс 40633 Подписка — во всех отделениях связи Украины  
 Журнал выходит ежемесячно. Цена одного номера — 3 гривни 64 коп.  
 Учредитель и издатель — научно-производственная фирма VD MAIS  
 Адрес: Украина, 01033, г. Киев-33, а/я 942, ул. Владимирская, 101  
 Тел. (380-44) 227-2262, 227-5281, 227-1356, 227-4249. Факс: (380-44) 227-3668  
 E-mail: vdmals@carrier.kiev.ua  
 http://www.vdmals.kiev.ua



**В каждом номере:**

- проблемы качества электронных компонентов и систем
- светодиоды и оптоэлектронные элементы
- полупроводниковые датчики физических величин
- усилители
- АЦП, ЦАП, AC/DC и DC/DC преобразователи
- микропроцессоры и микроконтроллеры
- средства телекоммуникаций
- промышленная электроника
- поверхностный монтаж и конструктивные элементы
- информация о семинарах, выставках и презентациях электронных компонентов, материалов и оборудования лучших мировых производителей

