

УДК 539.216:620.17

ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК И ПЛЕНОЧНАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

К.К. Зилинг

В конце шестидесятих годов как в советской, так и в зарубежной печати появились сообщения о разработке ряда приборов микроэлектроники, содержащих подвижные части (мембраны, пластинки, язычки), выполненные из конденсированных металлических либо органических металлизированных пленок. Необходимое для функционирования таких устройств перемещение подвижных частей осуществляется обычно за счет сил электростатического взаимодействия.

В частности, в США был предложен модулятор светового излучения лазера [1], в СССР — пленочное электростатическое реле [2]. К приборам этого же типа относятся и электромеханические пленочные модуляторы света для ввода данных в ЭВМ [3]. Подробное рассмотрение пленочных электромеханических устройств содержится в работе [4].

Характерной особенностью данных устройств является то, что свободные (не связанные с подложкой) пленки в них работают как конструкции, несущие механические нагрузки. В связи с этим прочностные свойства пленок оказывают существенное, а во многих случаях и определяющее влияние как на характеристики подобных приборов, так и на надежность их функционирования.

В настоящей работе рассматривается комплекс требований к механическим свойствам конденсированных металлических пленок, работающих в качестве подвижных элементов электромеханических устройств, и анализируется возможность получения этих свойств на реальных материалах.

1. Требования к механическим свойствам пленок. Рассмотрим требования к механическим свойствам пленок на примере наиболее широко используемого типа конструкций, содержащих натянутые пластины или мембраны. Толщина пленок в подобных устройствах обычно является величиной порядка одного мк.

Развитие в [5,6] математические модели показывают, что выражения, описывающие рабочие характеристики подобных устройств, содержат три группы параметров, связанных с механическими свойствами пленок:

- а) жесткость подвижной конструкции, определяемую упругими постоянными материалами;
- б) величину натяга мембран или пластин, определяемую механическими напряжениями в конструкции;
- в) величину зазоров между подвижными и неподвижными частями устройства, постоянство которых в процессе изготовления и эксплуатации определяется наряду с другими факторами изменением формы (короблением) мембран вследствие изменения внутренних напряжений.

Вследствие многообразия подобных устройств, единые требования к численным значениям и разбросу этих параметров вряд ли могут быть сформулированы однозначно. Тем не менее представляется, что в качестве достаточно разумных оценок могут быть приняты следующие:

- а) допустимый разброс упругих постоянных $\pm 10\%$;
- б) разброс и изменение во времени натяга мембран — 10% при абсолютном значении напряжений $10-40 \text{ кг/мм}^2$;
- в) разброс и изменение во времени величины зазора много меньше его абсолютной величины $1-5 \text{ мк}$.

Из этих оценок вытекает следующий комплекс требований к механическим свойствам пленок.

1. Разброс значений модуля Юнга E при неизбежном разбросе технологических параметров при получении пленок должен быть менее 10% .

2. Пределы упругости $\sigma_{0.02}$, текучести $\sigma_{0.2}$ и прочности σ_b должны быть много выше значений напряжений в конструкции.

3. Механические свойства не должны существенно меняться при длительном хранении, а также при отжиге в некотором температурном интервале.

4. Сопротивление ползучести и релаксации должно быть достаточно высоким для того, чтобы обеспечить требование постоянства натяга. Необходимо уметь предсказывать характер изменения напряжений во времени.

5. Поскольку во многих случаях натяжение в данных конструкциях создается за счет внутренних напряжений, появляющихся в пленке при ее изготовлении, величина этих напряжений должна быть достаточно хорошо воспроизводима и лежать в указанных выше пределах.

6. Так как пленочные электромеханические приборы обычно рассчитываются на достаточно большое число срабатываний (как правило — больше 10^6), пленки должны обладать высокими усталостными свойствами при несимметричных циклических нагрузках.

7. Во избежание изменения формы (коробления) неоднородность внутренних напряжений по толщине в натянутых конструкциях должна быть сведена к минимуму.

8. Кроме того, пленочные материалы не должны требовать для своего получения чрезмерно сложной технологии, а их структура и свойства не должны быть слишком чувствительны к малым изменениям технологических режимов.

2. М о д у л ь Ю н г а. К настоящему времени накоплено значительное количество экспериментальных данных, касающихся величины модуля Юнга в пленках [7-10]. Анализ этих данных показывает, что величины E в пленках близки к табличным значениям для массивных материалов. Наблюдаемый разброс значений E не превышает обычно $\pm 10\%$ и связан скорее всего с погрешностями измерений. Повышение модуля обнаружено только для весьма тонких (толщиной менее $2 \cdot 10^{-3} \text{ А}$) пленок, испытанных методом выдувания, что объясняется наличием в таких объектах исходных внутренних напряжений [8,10].

3. П р е д е л у п р у г о с т и, п р е д е л т е к у ч е с т и, п р о ч н о с т ь. Пластическая деформация при напряжениях много ниже предела прочности зафиксирована в

металлических пленках уже в ранних работах [7,8,11]. Более подробно микродеформации в интервале $10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$ исследованы в работах [12-14] на пленках меди. Найдено, что в отличие от массивной меди, микродеформации пленок не описываются моделью Брауна-Люкенса. Лучшие результаты дает сопоставление экспериментальных данных с формулой Холла-Петча: $\sigma = \sigma_0 + k d^{-1/2}$. Здесь σ - напряжение течения, σ_0 - напряжение течения монокристалла, d - размер кристаллов, k - параметр, зависящий от величины пластической деформации. Найдено, что основную роль в повышении напряжения течения пленок (и, в частности, предела упругости и текучести) играет малый по сравнению с массивными материалами размер зерен d . Так, уменьшение d до 0,35 мк приводит к возрастанию $\sigma_{0,03}$ до 30 кг/мм², а $\sigma_{0,2}$ - до 50 кг/мм². Еще более высокие упругие свойства могут быть получены на пленках сплавов. В частности, в работе [15] на пленках сплава Cu-Be зафиксированы значения $\sigma_{0,03} \geq 90$ кг/мм². Это равно или выше соответствующих значений, полученных на массивной бериллиевой бронзе после оптимальной термообработки.

Заметим, что в данном случае высокое значение $\sigma_{0,03}$ получено не за счет выпадения в пленках метастабильной γ' -фазы, а путем формирования стабильной мелкодисперсной структуры. Измельчение и стабилизация кристаллитов в пленках путем легирования их в процессе формирования посторонними примесями обнаружены во многих работах и, в частности, в работе [16].

Из существующих оригинальных работ и обзоров [9,10] хорошо известно, что конденсированные металлические пленки (в том числе и пленки толщиной более 1 мк) могут обладать весьма высокой прочностью. В частности, $\sigma_f \geq 100$ кг/мм² получен к настоящему времени на целом ряде конденсатов, как это видно из приведенной ниже таблицы:

Материал пленок	Толщина, [мк]	σ_f , [кг/мм ²]	Источник
Ni	3-30	130-100	[9]
Cu + (1-2)% Ge	2-30	120	[10]
пермаллой	1,5-3	140	[9]
Cu + 1,3% Be	2-4	100-140	[15]

Таким образом, получение пленочных материалов с требуемыми значениями $\sigma_{0,03}$, $\sigma_{0,2}$ и σ_f не представляет каких-либо принципиальных трудностей.

4. Стабильность структуры и механических свойств пленок. Известно, что в связи с высокой плотностью дислокаций и иных дефектов решетки, а также малыми размерами зерен и субзерен, структура вакуумных конденсатов (и, следовательно, их механические свойства) обычно менее стабильны, чем структура и свойства массивных материалов. Процессы отжига и, в некоторых случаях, низкотемпературной рекристаллизации могут идти в пленках даже при комнатной температуре [17-19]. В частности, в работе [18] найдено, что вылеживание конденсированных пленок меди при комнатной температуре сопровождается увеличением областей когерентного рассеяния и изменением плотности дефектов упаковки. Структурные изменения сопровождаются падением прочности на 10-20%. Наиболее чувствительным к изменениям субструктуры оказывается начальный участок диаграммы растяжения. Так, изменения при вылеживании величины $\sigma_{0,01}$ может достигать 50-70% [18].

Стабилизация структуры и свойств может быть достигнута путем увеличения температуры подложки при получении пленок [19], а также легированием пленок материалом тигля либо остаточными газами [17,18].

Наиболее резко структурные изменения в конденсированных пленках проявляются при отжиге [17,20]. Так, в работе [17] отжиг конденсатов меди при $T = 100^\circ\text{C}$ (т.е. много ниже температуры получения) привел к значительному укрупнению кристаллитов и росту областей когерентного рассеяния.

Как и при вылеживании, стабильность структуры и свойств пленок при отжиге может быть существенно увеличена путем легирования, в частности, легирования слабо растворимыми примесями, выпадающими по границам зерен и препятствующими рекристаллизации. Так, в работе [15] показано, что сточасовой отжиг пленок сплава Cu-Be при 125°C не приводит к падению механических свойств, а при двухчасовом отжиге высокие прочностные характеристики сохраняются вплоть до $T \sim 350^\circ\text{C}$. Таким образом, есть основания считать, что вопросы стабилизации механических свойств пленок могут быть решены достаточно успешно.

5. Ползучесть и релаксация пленок.

а) Феноменологические модели. Явление ползучести пленок при их нагружении известно довольно давно и отмечалось уже в ранних работах [7,21]. В работе [21] была сделана попытка определить зависимость деформации ползучести от времени, а в работе [23] — от времени и напряжения. Найдено, что эти зависимости имеют вид обычный для массивных материалов. Более полно закономерности ползучести и релаксации пленок меди и сплава $Cu-Be$ исследованы в работах [24-26] на специально разработанных испытательных установках [27-29]. Показано, что закономерности ползучести и релаксации пленок могут быть достаточно точно описаны с помощью гипотезы упрочнения — феноменологической модели, широко привлекаемой для описания поведения массивных металлов. В частности, в работе [24] на основании данных о ползучести пленок меди за 8 часов весьма точно предсказаны кривые релаксации за 100 часов, а в работе [26] по кривым ползучести пленок $Cu-Be$ за 100 часов с удовлетворительной точностью построены кривые релаксации за 700 часов. Таким образом, поведение конденсированных пленок при ползучести и релаксации может быть описано при помощи тех же механических моделей и, по-видимому, с той же степенью достоверности, что и поведение массивных материалов. Единственным обнаруженным отличием пленок является то, что вследствие их малой пластичности предварительный наклеп как средство их упрочнения при ползучести оказывается не эффективным [25].

К сожалению, все приведенные выше результаты относятся к ползучести при комнатной температуре. Вопрос о поведении конденсированных пленок при повышенных температурах испытаний фактически остается открытым.

б) Упрочняющие факторы. Абсолютные скорости ползучести пленок. В работах [23,24] найдено, что скорость ползучести конденсатов меди экспоненциально возрастает с напряжением. По аналогии с известной формулой Хуркова эту зависимость обычно записывают в виде: $\dot{\epsilon} \sim e^{\frac{\gamma \sigma}{kT}}$, где $\dot{\epsilon}$ — скорость ползучести, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

В работе [30] показано, что, по крайней мере при комнатной температуре, активационный объем γ оказывается единствен-

ным структурно-чувствительным фактором, как это имеет место и для массивных материалов. При этом найденные в [23,25] значения γ лежат в пределах $(1-8) \cdot 10^{-22} \text{ см}^3$, что существенно меньше величин $(2-6) \cdot 10^{-21} \text{ см}^3$, полученных для массивной меди. Причины подобных расхождений в настоящее время не вполне ясны, однако в работе [30] делается вывод о том, что уменьшение γ в пленках связано с малым размером кристаллов. Различие в γ приводит к тому, что при сопоставимых напряжениях 17-20 кг/мм² ползучесть в пленках идет по крайней мере на порядок медленнее, чем в массивной меди.

Тем не менее пленки таких материалов, как медь, совершенно не пригодны для изготовления несущих нагрузку конструкций. Действительно, в работе [24] показано, что при начальном напряжении $\sim 24 \text{ кг/мм}^2$ в пленках меди напряжения падают $\sim$ в 2 раза за время порядка 100 часов.

Существенно более высоким сопротивлением релаксации обладают пленки сплава $Cu-Be$ [26]. При начальном напряжении $\sigma_0 = 32,5 \text{ кг/мм}^2$ за 700 часов напряжения падают всего на 2-2,5%.

При $\sigma_0 = (20-30) \text{ кг/мм}^2$ экстраполяция полученных зависимостей дает десятипроцентное падение напряжения за время порядка 10 лет. Следует заметить, что, хотя последняя оценка по необходимости носит спекулятивный характер, результаты, полученные на пленках $Cu-Be$, дают основание считать полученные пленочные материалы с высоким сопротивлением ползучести и релаксации вполне реальной задачей.

6. Воспроизводимость величин внутренних напряжений в пленках.

Количество работ, посвященных измерению напряжений в конденсированных пленках весьма велико. Основные результаты отражены в существующих обзорах, в частности, в работах [9,31,32]. Для нас существенно, что, как это следует из имеющихся экспериментальных данных, внутренние напряжения в пленках могут быть условно разделены на две части: атермические и термические. Величина атермических напряжений определяется целым рядом факторов, часть которых контролируется слабо или вообще не контролируется: несоответствием параметров решеток пленки и подложки, диффузией в пленку, коагуляцией избыточных вакансий и т.д.

В результате атермические или "собственные" внутренние напряжения обычно плохо воспроизводимы и могут весьма значительно меняться при незначительных изменениях технологических параметров получения пленок.

Термическая часть внутренних напряжений определяется, главным образом, разностью температур при охлаждении и разницей коэффициентов термического расширения материалов пленки и подложки. Как правило, термические напряжения более воспроизводимы, хотя и могут частично релаксировать в процессе охлаждения [33]. При низких температурах подложки обычно преобладают атермические напряжения, при высоких — термические.

Таким образом, задача получения контролируемых напряжений в пленках может быть, по-видимому, сведена в ряде случаев к отысканию на кривой $\sigma - T$ такого участка, на котором внутренние напряжения σ имеют нужную величину и являются в основном термическими. В частности, для пленок *Si-Be* такой участок может быть найден из результатов работы [34]. Тем не менее имеющиеся результаты не позволяют в настоящее время дать численную оценку экспериментального разброса.

7. Усталость. Усталостные свойства металлических пленок фактически не изучены. Известна всего лишь одна экспериментальная работа [10], где на базе 10^6 циклов изучались усталостные характеристики конденсаторов никеля толщиной 20–30 мк. Испытания проведены при знакопеременном изгибе (симметричный цикл). Найдено, что предел усталости пленок σ_y составляет 42–28 кг/мм² в зависимости от условий получения при соответствующих величинах для массивного отожженного и накопленного никеля равных 18 и 28 кг/мм². Отмечено, что для исследованных пленок, так же как и для массивных материалов, выполняется соотношение $\sigma_y \approx (0,35 \div 0,4) \sigma_g$. Работы по выявлению влияния циклических нагрузок на ползучесть и релаксацию пленок отсутствуют вообще.

8. Неоднородность внутренних напряжений по толщине. Изменение формы мембран. Хорошо известно [9, 31, 32], что внутренние напряжения в пленках, как правило, неоднородны по толщине.

И хотя максимальные изгибающие напряжения обычно много меньше растягивающих (или сжимающих), они оказываются вполне достаточными для того, чтобы вызвать заметное изменение формы пленочных конструкций, в частности — межэлектродных зазоров. В работе [35] оценено влияние неоднородных напряжений на форму растянутой и закрепленной пластины в зависимости от ее геометрических размеров, упругих постоянных, величины растягивающих напряжений и других факторов. Полученные зависимости вполне удовлетворительно подтверждаются экспериментально и позволяют, в частности, более сознательно выбирать форму пластин. Исследования с этой точки зрения конструкций других типов, по-видимому, отсутствуют.

Характер неоднородных по толщине внутренних напряжений и их зависимость от технологических факторов и структуры пленок также изучены совершенно недостаточно.

9. Воспроизводимость механических свойств пленок. Значительный разброс механических свойств конденсированных пленок отмечается во многих публикациях, однако систематическое исследование этого вопроса содержится, по-видимому, только в одной работе [36], выполненной на пленках меди. Найдено, что разброс прочностных свойств внутри одной партии определяется, главным образом, двумя причинами: дефектами на поверхности подложек (царапины, посторонние частицы и т.д.) и химическим взаимодействием с материалом подложки.

Показано, что путем химической и механической обработок подложек разброс прочностных характеристик может быть уменьшен до приемлемых значений. Так, максимальный разброс величины σ_g составляет $\pm 15\%$ при этом 80% образцов не выходило из интервала $\pm 7\%$. Для $\sigma_{0,2}$ разброс был еще меньше. Подсчитанный из результатов работы [15] максимальный разброс σ_g пленок *Si-Be* не превосходит $\pm 18\%$.

Приведенные цифры показывают, что хотя воспроизводимость механических свойств конденсированных пленок заметно хуже, чем воспроизводимость соответствующих характеристик массивных металлов, разброс свойств пленок не является катастрофическим.

Из приведенного рассмотрения видно, что часть вопросов, касающихся механических свойств металлических пленок, исследована в настоящее время совершенно недостаточно. В первую очередь это относится к характеристикам усталости, ползучести при повышенных температурах, возникновению неоднородных по толщине внутренних напряжений.

В то же время анализ в какой-то степени исследованных прочностных характеристик (σ_b , $\sigma_{0.2}$, $\sigma_{0.01}$, ползучесть при комнатных температурах и т.д.) показывает, что материалы с необходимыми для пленочных электромеханических приборов свойствами могут быть получены уже сегодня. В частности, такими материалами могут быть некоторые сплавы на медной или никелевой основе.

Проведенный анализ дает также основания предполагать, что механические свойства пленок не будут тем фактором, который принципиально ограничивает возможности и работоспособность обобщаемых устройств.

Л и т е р а т у р а

1. PERSTON K. The membrane light Modulator. Пат. США №3433959, 1968 (приоритет от 25.07.66), №3479109, №3463372, 1968.

2. ДЯТЛОВ В.Л., СОЛДАТЕНКОВ И.С., ЧЕРЕПОВ Е.И. Электростатическое реле. Авт. свид. № 204440. - "Бюллетень изобретений", 1967, № 22, с. 54 (приоритет от 20.10.66).

3. ПРЕСТОН. Мембранный световой модулятор и его применение в оптических ЦВМ. - "Зарубежная радиоэлектроника", 1970, №10, с. 112-116.

4. ДЯТЛОВ В.Л., ФАДЕЕВ С.И. Пленочная электромеханика. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 58. Новосибирск, 1974, с. 100-112.

5. ЛУКЬЯНОВА Р.Г., ФАДЕЕВ С.И., ШВЕДОВА К.В. Расчет статистических параметров механической модели пленочного электростатического реле. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 40, Новосибирск, 1970, с. 3-50.

6. ДЯТЛОВ В.Л., ПЬЯНКОВ Ю.А., ФАДЕЕВ С.И., ШВЕДОВА К.В. Некоторые результаты расчета статистических характеристик пленочных электростатических реле. - В кн.: Вычислительные системы. Материалы ко II Всесоюзной конференции, секция IV, Новосибирск, 1969, с. 72-75.

7. NEUGEBAUER C.A. Tensile properties of thin evaporated gold films. - "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, N 6, p. 1096-1101.

8. ПИНЕС Б.Я., НГУЕН СУАН ТЯНЬ. Деформация и прочность тонких пленок. - "Физ. мет. и металловед.", 1965, т. 19, вып. 6, с. 899-907.

9. КРУКОВЕР П.И., БУРАВИХИН В.А. Механические свойства тонких металлических пленок. - В кн.: Физика магнитных пленок, Иркутск, 1967, с. 200-254.

10. ПАЛАТНИК Л.С., ИЛЬИНСКИЙ А.И. Механические свойства металлических пленок. - "Успехи физ. наук", 1968, т. 95, вып. 4, с. 613-645.

11. BLAKELY J.M. Mechanical properties of vacuum-deposited gold films. - "J. Appl. Phys.", 1964, v. 35, N 6, p. 1756.

12. ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.Ю. Микродеформации конденсированных пленок меди. - В кн.: Вычислительные системы, Материалы ко II Всесоюзной конференции, секция IV, Новосибирск, 1969, с. 80.

13. ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.Ю. Связь механических свойств со структурой конденсированных пленок меди. - "Физ. мет. и металловед.", 1970, т. 29, вып. 5, с. 1112.

14. ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.Ю. Механические свойства конденсированных пленок меди в области микродеформаций. - "Изв. вузов. Физика", 1970, № 6, с. 109.

15. БЕЛЕЙЧЕВА Т.Г., ЗИЛИНГ К.К., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Старение конденсированных пленок сплава Cu-Be. - "Изв. вузов. Физика", 1975, № 10.

16. ГРАНКИН А.И., ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д., ПЧЕЛКИН В.Ю. Окисление меди и сплава медь-бериллий при конденсации. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 126-128.

17. ПАЛАТНИК Л.С., ГЕВЛИЧ П.Г. Структура вакуумных конденсаторов меди после вылеживания. - "Физ. мет. и металловед.", 1967, т. 23, вып. 5, с. 892.

18. БЕЛЕЙЧЕВА Т.Г., ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.Ю. Изменение субструктуры и механических свойств конденсированных пленок меди при вылеживании. - "Физ. мет. и металловед.", 1972, т. 34, вып. 2, с. 418.

19. БЕЛЕЙЧЕВА Т.Г., ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.Ю. Исследование стабильности механических и структурных характеристик конденсаторов меди. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 52. Новосибирск, 1972, с. 119-124.

20. MANCINI N., RIMINI E. Annealing of polycrystalline Au and Au-Ag thin films. - "Surface Science", 1970, v. 22, N 2, p. 357.

21. SATLIN A., WALKER W. Mechanical properties of thin single-crystal gold films. - "J. Appl. Phys.", 1960, v. 31, N 12, p. 2135.

22. АЛЕКСАНЯН И.Т. О ползучести поликристаллических пленок меди. - "Физика мет. и металловед.", 1968, вып. 5, с. 947-948.

23. ФУКС М.Я., ПАЛАТНИК Л.С., ИЛЬИНСКИЙ А.И., БЕЛОЗЕРОВ В.В. Рентгенотензометрическое исследование упругой анизотропии кристаллов в поликристаллических конденсированных пленках. - "Физика твердого тела", 1967, т. 9, вып. 3, с. 751.

24. ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.Ю. Закономерности ползучести конденсированных пленок меди. - "Журнал прикладной механики и технической физики". 1971, № 3, с.110.

25. ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.Ю. Влияние предварительной деформации на ползучесть и релаксацию конденсированных пленок меди. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 52. Новосибирск, 1972, с. 115.

26. ЗИЛИНГ К.К., ИЛЬИН М.Н., ПЧЕЛКИН В.Ю. Ползучесть и релаксация пленок сплава *Cu-Be*. Там же, с. 107.

27. АРАДЖИОНИ В.А., ИЛЬИН М.Н. Установка для определения жесткости и натяжения металлических пленок. - В кн.: Вычислительные системы. Вып. 46. Новосибирск, 1971, с. 71.

28. ИЛЬИН М.Н. Датчик - преобразователь для измерения малых перемещений. - Там же, с. 74.

29. ИЛЬИН М.Н., ФАДЕЕВ С.И. Погрешности при измерении релаксации металлических пленок по первой резонансной частоте механических колебаний. - Там же, с. 68.

30. ВЕРБКИНА В.И., ЗИЛИНГ К.К., ПОКРОВСКИЙ Л.Д. Влияние структуры конденсированных пленок меди на ползучесть. Физ.мет. металловед. 1975, т.39, вып. 5, с.1086-1091.

31. VOOK R.W., WITT F. Termal stress in thin evaporated films. - "J.Appl.Phys.", 1965, v.36, N 7, p.2169-2171.

32. ФУКС М.Я., ПАЛАТНИК Л.С., КОЗЬМА А.А., ИЛЬИНСКИЙ А.И., РАВЛИК А.Г. Структура и свойства металлических пленок, Киев, "Наукова думка", 1968, с.95.

33. КЛОКНОЛМ Б., BERRY B.C. Intrinsic stress in evaporated metal films. - "J.Electrochem.Soc.", 1968, v.115, N 8, p.823-826.

34. БЕЛЕЙЧЕВА Т.Г. О температурной зависимости внутренних напряжений в пленках на примере конденсатов бериллиевой бронзы. - Настоящий сборник, с. 123-128.

35. ЗИЛИНГ К.К., СОЛДАТЕНКОВ И.С. Прогнозы в тонких растянутых пластинах, имеющих первоначальную кривизну. - Настоящий сборник, с. 115-122.

36. ГРАНКИН А.И., ЗИЛИНГ К.К., ПЧЕЛКИН В.В. Зависимость механических свойств конденсатов меди от дефектов поверхности. - В кн.: Вычислительные системы. Материалы ко II Всесоюзной конференции. Секция IV. Новосибирск, 1969, с.82-85.

Поступила в ред.-изд.отд.
28 января 1975 года