

## ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

1. **Нетушил А.В.** Модели электрических полей в гетерогенных средах нерегулярных структур // Электричество. - 1975. - № 10. - С.1-8.
2. **Дульнев Г.Н., Новиков В.В.** Процессы переноса в неоднородных средах . - М.: Энергоатомиздат. - 1991. - 248 с.
3. **Арамян М.А.** Уточнение в теории расчета диэлектрической проницаемости Максвелла-Вагнера // Изв.РАН. Коллоидный журнал. - 1992. - Т. 54, №5. - С.24-33.
4. **Арамян М.А.** К расчету полей в слоистых структурах и вычисление интегральных параметров // ИФЖ. - 1994.- Т. 67, № 1-2. - С. 132-140.
5. **Арамян М.А.** К моделям электрических полей в гетерогенных средах нерегулярных структур // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1995. - Т.48, № 3.- С.190-194.
6. **Арамян М.А.** Расчет потенциальных полей и средних параметров дисперсных систем регулярных структур с различными формами включений // Электричество. - 1997. - № 2. - С. 64-69.
7. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Электродинамика сплошных сред. - М.: Гос. издат. техн.-теор. лит. - 1985. - 532 с.
8. **Тамм И.Е.** Основы теории электричества. - М.: Наука, 1989. - 504 с.
9. **Стрэттон Дж.А.** Теория электромагнетизма. - М.: Гос.изд.техн.-теор. лит.,1948. - 540 с.

Ծած

02.03.1999

Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 1.

УДК 621.382.333

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Е. АЙВАЗЯН

### ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПЛЕНКА-ПОДЛОЖКА

Վերլուծված են թաղանթ-հարթակ համակարգում ներքին լարվածությունների որոշման համար Սթոունիի բանաձևերի կիրառման սահմանները:

Проанализированы пределы применимости формул Стоуни для расчета внутренних напряжений в системе пленка-подложка.

Ил.2. Библиогр.: 6 назв.

The analysis of Stowne's formula applicability limits for the internal stress calculation in the film-substrate system has been made.

Ill.2. Ref. 6.

Исследованию напряженно-деформированного состояния систем пленка-подложка, широко применяемых в микроэлектронике, посвящено большое количество работ [1-5]. Во всех этих работах определение

внутренних напряжений (ВН) осуществлялось механическим методом по величине деформации подложки с использованием формул Стоуни:

для напряжений в пленке:

$$\sigma_{\text{ВН}} = \frac{E}{3(1-\nu)r^2} \cdot \frac{h^2}{t} f; \quad (1)$$

для напряжений в подложке:

$$\sigma_{\text{ВН}} = \frac{2E}{(1-\nu)r^2} \left( x - \frac{2}{3}h \right) f, \quad (2)$$

где  $E$ ,  $\nu$  - модуль Юнга и коэффициент Пуассона подложки;  $h$ ,  $r$  - толщина и радиус подложки;  $t$  - толщина пленки;  $x$  - текущая координата, отсчитываемая от границы раздела системы;  $f$  - деформация подложки в результате нанесения пленки.

При выводе (1) и (2) в качестве одной из основных предпосылок, наряду с изотропностью напряжений и равенства модулей Юнга пленки и подложки, принималось, что деформация подложек вызывается действием изгибающего момента, который создается ВН в пленке. Такая предпосылка вряд ли безоговорочно приемлема, так как эпюра ВН в пленке является полностью уравновешенной и, следовательно, не может создавать изгибающего момента. Другое ограничение состоит в том, что по (1) можно определить только интегральную величину ВН в пленке. В связи с изложенным возникает вопрос о пределах применимости формул Стоуни для определения ВН в системе подложка-пленка.

Для получения более точных формул расчета ВН в системе пленка-подложка воспользуемся методом начальных напряжений [5]. Допустим, что на жестко закрепленной подложке формировалась пленка с начальными напряжениями (НН)  $\sigma_{\text{НН}}$  (рис. 1а). После освобождения подложки происходит перераспределение  $\sigma_{\text{НН}}$ , что равносильно дополнительному приложению к системе пленка-подложка напряжений от осевых сил  $\sigma_0$  и изгибающих моментов  $\sigma_M$  (рис. 1б). Эти напряжения совместно с НН образуют уравновешенную конечную эпюру ВН (рис. 1в):

$$\sigma_{\text{ВН}} = \sigma_{\text{НН}} + \sigma_0 + \sigma_M. \quad (3)$$

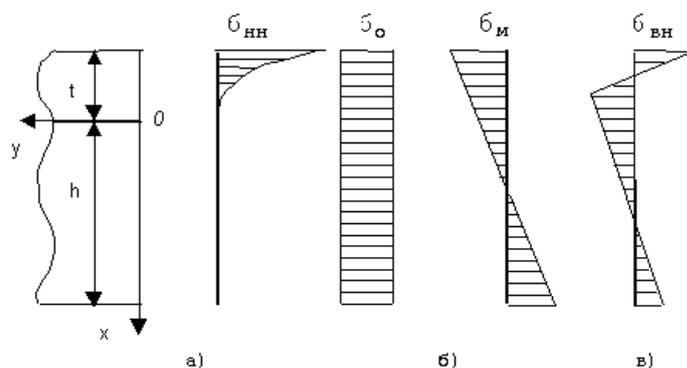


Рис.1. Графическое описание процесса образования ВН:  
 а) система пленка-подложка с НН в пленке; б) эпюры напряжений от осевых сил и моментов; в) конечная эпюра ВН

Напряжения  $\sigma_0$  и  $\sigma_M$  определяются из условий равновесия системы и подсчитываются по формулам [5]

$$\sigma_0 = -\frac{1}{h} \int_0^t \sigma_{HH} dx, \quad (4)$$

$$\sigma_M = -\frac{12}{h^3} \left( \frac{h}{2} - X \right) \left( \frac{h}{2} - x \right) \int_0^t \sigma_{HH} dx, \quad (5)$$

где  $X = \frac{\int_0^t \sigma_{HH} x dx}{\int_0^t \sigma_{HH} dx}$  - координата центра тяжести эпюр НН.

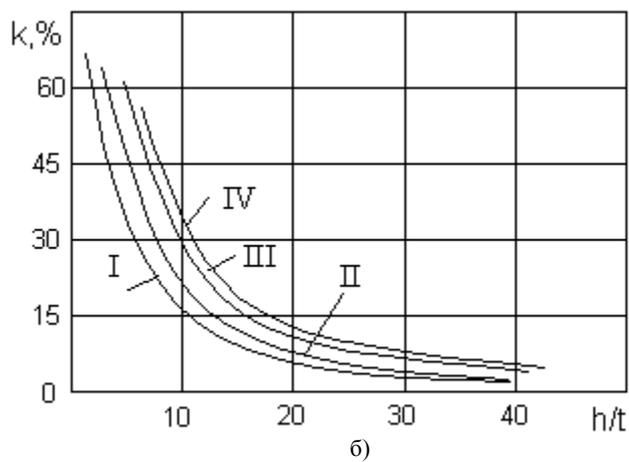
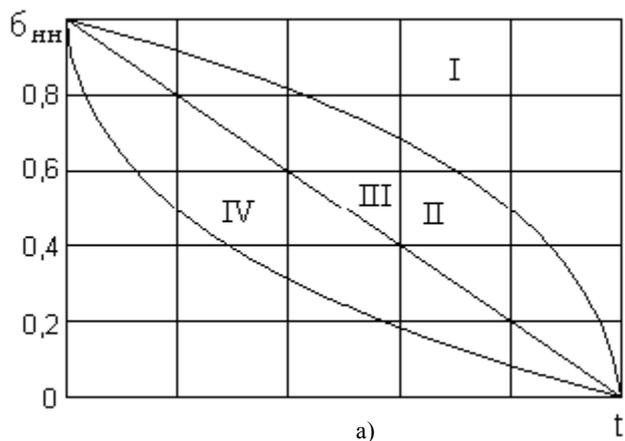


Рис.2. Определение относительной погрешности расчета:  
 а) эпюры НН в пленке (I-IV - номера эпюр); б) зависимость относительной погрешности расчета деформации системы пленка-подложка от отношения толщины подложки к толщине пленки

Деформацию подложки можно найти, воспользовавшись известной из теории упругости зависимостью

$$f = 6Mr^2(1 - \nu)/Eh^3.$$

Принимая во внимание, что изгибающий момент равен

$$M = \left(\frac{h}{2} - X\right) \int_0^t \sigma_{\text{НН}} dx,$$

получаем

$$f = \frac{6r^2(1 - \nu)}{Eh^3} \left(\frac{h}{2} - X\right) \int_0^t \sigma_{\text{НН}} dx. \quad (6)$$

Из полученных зависимостей следует, что при строгом расчете ВН по величине деформации подложки промежуточным этапом является нахождение НН по (6). Затем, зная  $\sigma_{\text{НН}}$ , по (3)-(5) рассчитываются  $\sigma_0$ ,  $\sigma_M$  и  $\sigma_{\text{ВН}}$ .

Для определения пределов допустимости прямой замены НН внутренними, что фактически имеет место в формулах Стоуни, вычислим деформации системы пленка-подложка по двум вариантам: по заданным НН с помощью формулы (6) и отвечающим им ВН с помощью формул (3)-(5) и (1). Оценим относительную погрешность расчета К, которую дает второй вариант в сопоставлении с первым. С целью получения достаточно общих результатов расчет произведем для нескольких эпюр НН, имеющих различную форму (рис. 2а). Максимальные значения НН на заданных эпюрах условно приняты за единицу. Как следует из полученных зависимостей (рис. 2б), относительная погрешность расчета ВН по формулам Стоуни зависит от отношения толщины пленки  $t$  к толщине подложки  $h$ . Видно, что с увеличением  $h/t$  относительная погрешность расчета уменьшается и не превышает 5% при  $h/t > 30$ . Существенное влияние оказывает также форма эпюры НН. Погрешность расчета увеличивается с уменьшением площади, занимаемой эпюрой НН.

Таким образом, когда требуется более точное определение ВН в системе пленка-подложка, расчет необходимо проводить через НН. В математическом аспекте эта задача представляет собой не что иное, как восстановление функции сигнала  $\sigma_{\text{НН}}(x)$  по известной функции отклика  $f(x)$ . Практическая реализация задачи требует измерения деформации  $f(x)$  при послойном удалении напряженных слоев системы пленка-подложка. Такой подход использован нами ранее для определения механических напряжений в диффузионных слоях кремниевых структур [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Singer P.** Film Stress and How to Measure it // Semiconductor International.- 1992.- № 10.- P. 54-58.
2. **Ayvazyan G.E.** Anisotropic Warpage of Wafers with Anodized Porous Silicon Layers // Phys. Stat. Sol. (a).- 1999. - V. 175.- P.7-8.
3. **Сергеев В.С., Кузнецов О.А.** и др. Напряжения и деформации в элементах микросхем.- М.: Радио и связь, 1994.- 88 с.
4. **Ullman J., Kellock A.J., Baglin J.E.** Reduction of Intrinsic Stress in Cubic Boron Nitride Films // Thin Solid Films.- 1999. - V.341.- P.238-245.

5. Айвазян Г.Е., Скворцов А.М. Осевая деформация структуры подложка-пленка // Электронная техника. - Сер. Микроэлектр. 1987.- Вып. 3.- С. 107-111.
6. Айвазян Г.Е., Багдасарян А.Б., Варданян А.А. Об определении остаточных напряжений в диффузионных слоях // Изв. АН Армении.- Сер. ТН.- 1993.-Т. 56, № 1.- С.34-37.

НПП “Транзистор”

02.05.1999

Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2000. Т. LIII, № 1..

УДК 621.31

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Ю.М. ШАХНАЗАРЯН, Р.Г. ТУМАНЯН

### ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ В РЕЖИМЕ ИСТОЧНИКА ТОКА

Դիտարկվում է շեգոք  $R_H$  հաղորդալարով ոչ սիմետրիկ եռաֆազ շղթա: Ֆազերում միացված են  $R_A$ ,  $X_B$  և  $X_C$  բեռներ: Վերջին երկուսը մեծությամբ հավասար են, իսկ բնույթով տարբեր: Ցույց է տրված, որ  $R_A \gg R_H$  պայմանի դեպքում բեռում հոսանքը կախված չէ  $R_H$ -ի մեծությունից, այսինքն, ամբողջ եռաֆազ շղթան  $R_H$  բեռի համեմատ կարելի է ներկայացնել որպես հոսանքի աղբյուր:

Рассматривается несимметричная трехфазная цепь с нейтральным проводом, в котором находится полезная активная нагрузка  $R_H$ . В фазы включены нагрузки  $R_A$ ,  $X_B$  и  $X_C$ , равные между собой по величине, но разные по характеру. Показывается, что при  $R_A \gg R_H$  ток в нагрузке  $R_H$  не зависит от значения  $R_H$ , т.е. всю трехфазную цепь по отношению к нагрузке  $R_H$  можно представить источником тока.

Ил. 3. Табл.3. Библиогр.: 3 назв.

A nonbalanced three-phase circuit containing active resistance  $R_H$  in a neutral line is considered. The phases A, B, C contain, respectively,  $R_A$ ,  $X_B$ ,  $X_C$ . The reactances of  $X_B$  and  $X_C$  are different, but their modules are equal. It is shown that the current  $R_H$  does not depend upon the magnitude of  $R_H$  in case when  $R_A \gg R_H$ . The entire three- phase circuit, relative to the resistance  $R_H$ , can be represented as a source of current.

Илл 3. Tables 3. Ref. 3.

В последнее время в схемах автоматизированного электропривода с двигателями постоянного тока все чаще стали применяться источники питания в виде источников тока (ИТ) вместо общепринятых источников ЭДС. Этот вопрос подробно освещался в [1-3], где рассматривался индуктивно-емкостный ИТ, использующий конденсаторы, индуктивности и полупроводниковые вентили. При этом в якоре двигателя постоянного тока протекает неизменный и не зависящий от ЭДС ток, а электропривод приобретает новые свойства и характеристики.