

Применение уравнений (1) и (2) для анализа распределения напряжений в двухслойных пластинах позволило теоретически доказать неравноценность лучевой [3—5] и биметаллической моделей [2, 6, 7], широко применяемых для расчета величин термических обратимых напряжений, возникающих в двухслойных полупроводниковых системах. Большинство авторов [например, 1—3] не учитывало возможности изменений в распределении напряжений по пластине при различных способах изгиба, что явилось причиной противоречивых выводов о влиянии деформаций на изучаемую активную область полупроводника. В случае, если этой областью является  $p-n$ -переход, имеющий глубину залегания  $\Delta l$ , то, используя выражения (1) и (2) для расчета напряжений в тонких продольных слоях полупроводниковых пластин, методом графического построения эпюр распределения напряжений можно определить их величины в элементах толщиной  $\Delta l$ , расположенных на одинаковом расстоянии от оси  $x$ , которые, как видно из рисунка, различны.

В каждом конкретном случае задача по определению напряжений, возникающих при деформации двухслойных полупроводниковых систем, должна учитывать природу действующих на изгибающуюся систему сил и распределение напряжений в их слоях.

Следует отметить, что имеется достаточное количество работ [8, 9], в которых показано, что термические напряжения сконцентрированы в тонкой области, вблизи границы раздела слоев, т. е. нелинейно распределены по их толщине, в то время как теория биметаллических пластин применима только при линейном распределении напряжений в слоях. Следовательно, основным условием применимости биметаллической модели для расчета термических деформаций в двухслойных системах является линейность распределения напряжений в слоях, которая для достоверности результатов исследований в каждом случае должна подтверждаться экспериментально. Применение биметаллической модели для двухслойных систем с нелинейным распределением напряжений в слоях недопустимо.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Канделаки Т. С., Синица С. П., Эдельман Ф. Л.—Микроэлектроника, 1973, т. 2, № 3, с. 259.
2. Козлов Б. И., Раков А. В.—Электронная техника, 1971, т. 6, № 3, с. 71.
3. Jassodine R. J., Schlegel W. A. J.—Appl. Phys., 1966, v. 37, № 6, p. 2429.
4. Тимошенко С. П. Сопrotивление материалов, т. 1.—М., 1965, с. 363.
5. Whelan M. V., Goemans A. H. and Goossens L. M. C.—Appl. Phys. Lett., 1967, v. 10, № 10, p. 262.
6. Тимошенко С. П. Устойчивость стержней, пластин и оболочек.—М., 1971, с. 807.
7. Воробьев А. И., Канцельсон О. Г. Термобиметалл и его применение в приборостроении и автоматике.—М.-Л., 1951, с. 127.
8. Козлов Б. И., Раков А. В.—Электронная техника, 1971, т. 6, № 8, с. 68.
9. Serebrinsky J. H.—Solid State Electron, 1970, v. 13, № 11, p. 1435.

Поступила в редакцию  
19.05.79.

НИИ ПФП

УДК 537.525.5

В. Е. ГРАКОВ, А. С. МАЙГА

### ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА КАТОДНОЕ ПАДЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВАКУУМНЫХ ДУГ

В связи с многочисленными техническими применениями электрических вакуумных дуг их исследование продолжает оставаться актуальным [1]. В МГД-генераторах, вакуумных выключателях, плазмотронах [2, 3] широко используется воздействие на дуги магнитного поля, поэто-

му систематические исследования вакуумных дуг в магнитном поле могут оказаться полезными при решении ряда чисто прикладных задач, а также и для дальнейшего изучения дуговых процессов, относительно которых до сих пор еще нет полной ясности [1].

Вакуумные дуги в поперечном магнитном поле исследовались одним из авторов [4]. Предлагаемая работа посвящена вакуумным дугам замыкания в продольном магнитном поле, причем, как и прежде, внимание в основном концентрируется на таких параметрах дуги, как катодное падение потенциала  $U_c$  и средняя продолжительность горения  $\tau$ . Изучались дуги на чистых металлах Al, Mg, Cr, Co, Ni, Sn, Cd с широким диапазоном различных свойств, влияющих на условия существования катодных пятен. Поскольку дуги были короткими, напряжение горения на них можно было отождествлять с катодным падением. Ток в дугах лишь в несколько раз превышал пороговые значения, благодаря чему структура катодных пятен была наиболее простой. Эти обстоятельства должны, несомненно, благоприятствовать теоретической интерпретации экспериментальных результатов.

Исследования проводились на экспериментальной установке [4], в которой конструкция разрядника изменена так, чтобы дуга возбуждалась между полюсами электромагнита в направлении вдоль магнитного поля. Импульсное питание электромагнита позволило повысить максимальную величину индукции магнитного поля до 0,115 тл. Кроме того, для измерения продолжительности горения дуги в установку был введен электронно-счетный частотомер ЧЗ-33. В связи с тем, что в процессе горения напряжение на электродах дуги испытывает колебания в широком диапазоне частот и амплитуд, для согласования частотомера с исследуемой дугой потребовалось разработать специальный блок с двумя диодными ограничителями. Один ограничитель позволял отделять начальный фронт напряжения горения дуги от небольших перепадов напряжения, связанных с жидкими мостиками при замыкании электродов. Этот начальный фронт, поступая на вход А частотомера, запускал его. Второй ограничитель отделял фронт повышения напряжения, возникающий при погасании дуги, от естественных колебаний дугового напряжения. Фронт погасания подавался на вход Б частотомера и вызывал его остановку. Методика измерений средних значений катодного падения  $U_c$  и продолжительности горения дуги  $\tau$  в общих чертах сохранилась такой же, как и в работе [4].

В ходе исследований установлены следующие экспериментальные факты.

1. Продольное магнитное поле вызывает низкочастотные осцилляции напряжения горения дуги с частотой порядка 100 Гц, причем средний уровень напряжения медленно повышается, достигая наибольшего значения к моменту погасания дуги. Наиболее четко осцилляции проявляются в дугах на Cd, Ni и Cr. Как правило, по мере горения дуги амплитуда осцилляций уменьшается, и через несколько периодов они становятся трудно различимыми. При достаточно сильном магнитном поле дуга проявляет тенденцию к погасанию на нечетных полупериодах осцилляций, соответствующих повышению напряжения горения. Частота осцилляций, по-видимому, не зависит от индукции магнитного поля  $B$  и тока дуги  $i_g$ , а их амплитуда возрастает с увеличением  $B$  и с уменьшением  $i_g$ .

2. В исследованной области средний уровень катодного падения  $U_c$  линейно возрастает с увеличением индукции магнитного поля  $B$ , в некоторых случаях проявляя тенденцию к насыщению. При этом оказалось, что скорость возрастания увеличивается по мере увеличения тока дуги  $i_g$ . Величина повышения среднего уровня катодного падения  $\Delta U_c$ , вызванного магнитным полем с индукцией  $B=0,05$  тл в дугах, токи которых  $i_g$  лишь незначительно превышают пороговые значения, составляет от 0,2 до 0,5 В, в зависимости от катодного материала дуги (рис. 1).

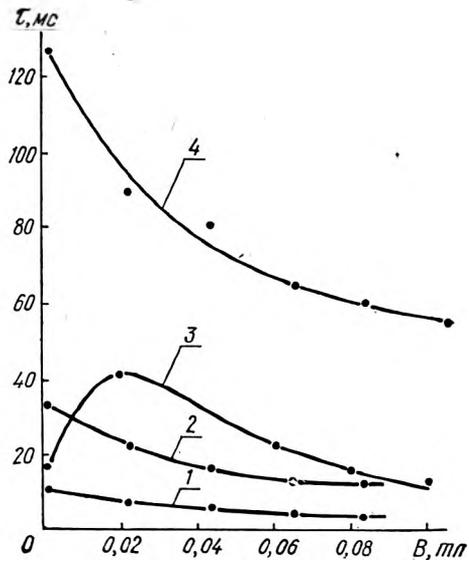
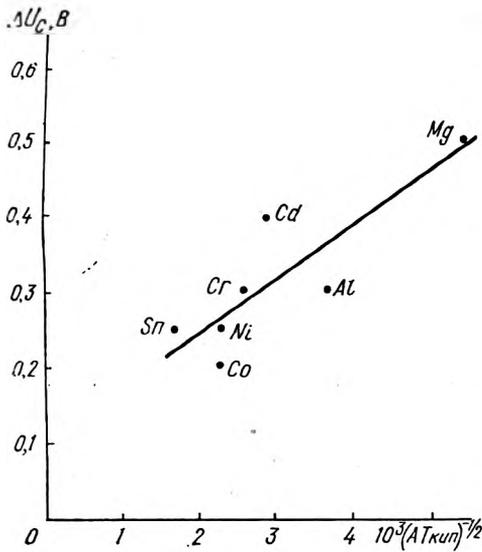


Рис. 1. Зависимость повышения продольным магнитным полем ( $B=0,05$  тл) катодного падения  $\Delta U_c$  вакуумных дуг при минимальных токах от параметра  $(AT_{кид})^{-1/2}$ .

Рис. 2. Зависимость средней продолжительности горения  $\tau$  Cr- и Cd-дуг от индукции продольного магнитного поля  $B$ :

1 — Cr-дуга,  $i_g = 8$  А; 2 — Cr-дуга,  $i_g = 1$  А; 3 — Cr-дуга,  $i_g = 15$  А; 4 — Cd-дуга,  $i_g = 3,1$  А

3. Средняя продолжительность горения дуг  $\tau$  убывает с увеличением магнитного поля (рис. 2). В большинстве случаев убывание монотонное, близкое к экспоненциальному, однако для Cr и Ni-дуг при достаточно больших токах имеет место максимум  $\tau$ , расположенный в области  $B=0,02 \div 0,04$  тл. Зависимость  $\tau$  от  $B$  ослабевает по мере приближения тока дуги  $i_g$  к пороговому значению.

Наиболее подробное исследование зависимости  $\tau$  от  $B$  выполнено для Cd-дуги в области токов от порогового до  $i_g=2$  А. Установлена следующая эмпирическая формула, связывающая  $\tau$  с током дуги и индукцией магнитного поля:

$$\ln \tau = 4,7(i_g - i_{g0}) - (60i_g - 42)B; \quad (1)$$

$$i_{g0} \leq i_g \leq 2A.$$

Здесь  $\tau$  выражается в миллисекундах,  $i_g$  — в амперах,  $B$  — в теслах. Ток  $i_{g0}$  имеет смысл порогового тока и равен приблизительно 0,3 А. При токах дуги  $i_g > 2$  А формула (1) дает заниженные значения  $\tau$ .

4. Магнитное поле оказывает влияние на характер свечения прикатодного пространства. Наиболее отчетливо это влияние проявляется в случае Cd-дуги. В отсутствие магнитного поля слабое свечение равномерно заполняет все пространство, примыкающее к электродам. При включении продольного магнитного поля зона свечения стягивается в шнур, направленный от катода к аноду, который перемещается вместе с катодным пятном. По мере увеличения магнитного поля толщина этого шнура уменьшается. Эффект шнурования, по-видимому, не зависит от знака направления магнитного поля относительно тока дуги, как, впрочем, не зависят от него явления и параметры, описанные в пунктах 1—3.

Существенно, что каких-либо заметных особенностей в поведении дуг на ферромагнитных катодах при наложении на них продольного магнитного поля обнаружено не было.

Переходя к предварительному анализу экспериментальных результатов, коснемся вначале возможных физических причин уменьшения среднего времени горения дуги продольным магнитным полем. Умень-

шение  $\tau$  фактически означает снижение внутренней устойчивости дуги. Ключ к объяснению этого явления, на наш взгляд, дает описанный эффект «шнурования». Продольное магнитное поле закручивает ионы катодных плазменных струй вокруг оси, перпендикулярной к катоду, не позволяя им распространяться вдоль поверхности катода. Вызванное этим уменьшение тангенциальных плазменных потоков приводит к тому, что существенно затрудняется переход катодного пятна на соседние участки катода и, следовательно, снижается эффективность восстановительного механизма. По-видимому, одновременно появляется также дополнительная макроскопическая неустойчивость, с которой связаны сравнительно медленные осцилляции напряжения горения дуги. Выяснение физической природы этой неустойчивости потребует новых экспериментов. Что касается максимумов на кривых зависимости  $\tau$  от  $B$  в дугах на Ni и Cr, то их происхождение, возможно, связано с появлением стационарных катодных пятен второго типа.

Эффект «шнурования» позволяет в общих чертах объяснить также наблюдавшееся в продольном магнитном поле повышение катодного падения, которое, по-видимому, является простым следствием увеличения концентрации заряженных частиц в катодном пятне. Величина повышения катодного падения  $\Delta U_c$ , очевидно, будет тем больше, чем сильнее магнитное поле затруднит поперечную диффузию ионов. Отсюда следует, что величина  $\Delta U_c$  должна находиться в функциональной связи с циклотронным радиусом ионов  $R_i$ :

$$R_i = m_i v_i / eB, \quad (2)$$

где  $m_i$  — масса ионов;  $v_i$  — их скорость;  $e$  — элементарный заряд. Характер этой функциональной связи можно найти из экспериментально обнаруженной прямо пропорциональной зависимости  $\Delta U_c$  от  $B$ . Очевидно,

$$\Delta U_c \sim B / m_i v_i. \quad (3)$$

Как показано в [5], скорость ионов определяется температурой кипения материала катода  $T_{\text{кип}}$  и его атомным весом  $A$ :

$$v_i \sim (T_{\text{кип}}/A)^{1/2}. \quad (4)$$

Таким образом,

$$\Delta U_c \sim B / (AT_{\text{кип}})^{1/2}, \quad (5)$$

откуда следует, что при фиксированном значении  $B$  повышение катодного падения  $\Delta U_c$ , вызванное магнитным полем, прямо пропорционально параметру  $(AT_{\text{кип}})^{-1/2}$ .

Эти соображения более всего применимы к режимам с минимальным током дуги, когда условия в катодном пятне являются наиболее простыми и в значительной степени унифицированными. И действительно, рис. 1 указывает на достаточно четкую корреляцию экспериментальных значений  $\Delta U_c$  (при  $B=0,05$  тл) с величиной  $(AT_{\text{кип}})^{-1/2}$ , что свидетельствует в пользу предложенного механизма. Вместе с тем ясно, что на величину  $\Delta U_c$  должна оказывать влияние также отмеченная макроскопическая неустойчивость дуги, учесть которую окажется возможным лишь после выяснения ее природы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Любимов Г. А., Раховский В. И.—УФН, 1978, т. 125, вып. 4, с. 665.
2. Перцев А. А., Гусева Л. Г., Куликов А. Е.—ЖТФ, 1977, т. 47, вып. 10, с. 2112.
3. Косинов В. А., Янковский А. И.—В сб.: Материалы к 7-й Всесоюзной конф. по генераторам низкотемпературной плазмы, т. 1.—Алма-Ата, 1977.
4. Граков В. Е.—Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1, мат., физ., мех., 1978, № 1, с. 38.
5. Граков В. Е., Майга А. С.—Вестн. Белорусского ун-та. Сер. 1, физ., мат. и мех., 1980, № 3, с. 62.