

нейтронами с влиянием нагревания на интенсивность наиболее сильных линий СКР  $\alpha$ -кварца показало (см. рис. 2), что интегральная интенсивность линий возрастает с увеличением температуры образца [11—14], но падает с ростом дозы облучения. Аналогичное аномальное поведение (обратное температурному ходу) наблюдается и у некоторых упругих постоянных кварца, облученного быстрыми нейтронами [2, 16].

На рис. 2 дозе  $0,4 \times 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> соответствует эффективная температура 340°K; дозе  $3 \times 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> — 500°K; дозе  $4,5 \times 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> — 590°K и дозе  $6 \times 10^{19}$  н/см<sup>2</sup> — 870°K. Кривые 1 и 2 — температурный ход интенсивности линий 206 и 466 см<sup>-1</sup>, полученный экспериментально в [11 и 12], 3 и 4 — зависимость интенсивности линий 128 и 206 см<sup>-1</sup> от эффективной температуры, соответствующей определенной дозе облучения быстрыми нейтронами [8].

Авторы благодарят Е. Г. Зубареву за помощь при обработке спектрограмм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зубов В. Г., Осипова Л. П. ДАН СССР, 144, 763, 1962.
2. Зубов В. Г. Реферат докторской диссертации, 1963.
3. Зубов В. Г., Осипова Л. П. ДАН СССР, 156, 300, 1964.
4. Зубов В. Г., Осипова Л. П. «Кристаллография», 6, 418, 1961.
5. Бажулин П. А., Сущинский М. М. «Успехи физических наук», 68, 135, 1959.
6. Зубов В. Г., Осипова Л. П. «Кристаллография», 15, 313, 1970.
7. Жданов Г. С., Зубов В. Г. и др. «Кристаллография», 8, 207, 1963.
8. Зубов В. Г., Осипова Л. П. «Кристаллография», 15, 992, 1970.
9. Колонцова Е. В., Телегина И. В. «Физика твердого тела», 8, 3412, 1966
10. Колонцова Е. В., Телегина И. В. ДАН СССР, 173, 1045, 1967.
11. Стеханов А. И., Числер Э. В. «Физика твердого тела», 3, 3514, 1961.
12. Стеханов А. И., Числер Э. В. «Вестн. Ленингр. ун-та», физ. хим., 4, № 1, 159, 1959.
13. Бобович Я. С., Тулуб Т. П. «Оптика и спектроскопия», 6, 566, 1959.
14. Бобович Я. С., Тулуб Т. П. «Оптика и спектроскопия», 9, 747, 1960.
15. Дине Дж., Виньярд Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. М., 1960.
16. Жданов Г. С., Зубов В. Г., Иванова А. Т., Фирсова М. М. «Кристаллография», 3, 720, 1958.

Поступила в редакцию

Кафедра  
общей физики для физиков

УДК 537.226+537.311.3,

А. Е. БАЖАНОВА, Ю. А. ЗАРИФЬЯНЦ

## СОВМЕСТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И АДСОРБЦИИ НА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПЛЕНКЕ

В современной микроэлектронике широко используются тонкие полупроводниковые пленки, параметры которых в значительной степени зависят от адсорбции на их поверхности газов из окружающей атмосферы. Поэтому особо актуальны количественные исследования взаимосвязи между электрофизическими свойствами пленки и хемосорбцией. Сведения о подобных исследованиях в литературе отсутствуют, хотя во многих работах и приводятся данные о величинах хемосорбции на пленках, полученные косвенными методами. Возможности обычных методов измерения адсорбции на пленках ограничены низкой чувствительностью. В настоящей работе нам впервые удалось провести параллельные измерения адсорбции на пленке ( $n_a$ ) и изменения ее электропроводности ( $\Delta\sigma$ ), используя так называемый метод «пьезорезонансных кварцевых весов», обладающий чувствительностью  $10^{-10}$  г и инерционностью менее 1 сек [1].

В качестве объекта исследования были использованы пленки сульфида свинца  $n$ -типа, электрические свойства которых чрезвычайно сильно зависят от адсорбции. Пленки PbS наносились термическим испарением в вакууме на обе стороны пластины. Полученные слои, по данным электронограмм, обладали структурой, весьма близкой

к монокристаллической. Кроме того, подвижность электронов в пленках лишь немного уступала соответствующим значениям для монокристаллов, так что роль барьерных эффектов на границах между блоками была несущественной. В качестве адсорбата мы выбрали двуокись азота, которая позволяет в широких пределах изменять электрические параметры сернисто-свинцовых сопротивлений [2]. Величина адсорбции отнеслась к единице истинной поверхности пленки, определяемой из низкотемпературной адсорбции аргона [1]. Коэффициент шероховатости исходной поверхности кварца был равен 50, а нанесенной пленки — 150. Чувствительность метода в таких условиях составила  $\sim 8 \cdot 10^{12}$  мол.см<sup>-2</sup>. Электропроводность измерялась на постоянном токе. Пе-

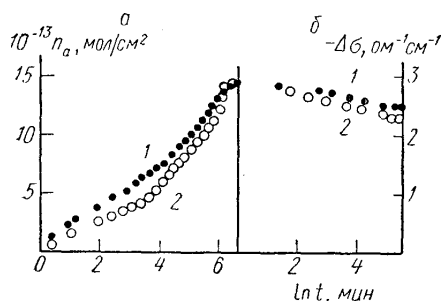


Рис. 1. Кинетика изменения  $n_a$  (1) и  $\Delta\sigma$  (2) после напуска  $NO_2$  при 0,1 мм рт. ст. (а) и после откачки (б)

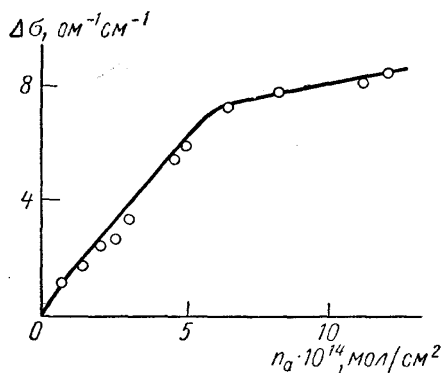


Рис. 2. Зависимость стационарных величин  $\Delta\sigma$  от числа адсорбированных молекул

ред началом опыта образец обезгаживался в вакууме  $2 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. при 250°C. Все измерения проводились при  $25^\circ \pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Первый этап исследований включал одновременные измерения кинетики хемосорбции и  $\Delta\sigma$  после напуска  $NO_2$  при постоянном давлении (рис. 1, а). Как видно из рисунка, закон изменения обеих величин одинаков. На кривых можно выделить два участка, каждый из которых удовлетворительно описывается уравнением Еловича:  $y = k \lg(1 + t/t_0)$ , где  $k$  и  $t_0$  — константы. После установления стационарных значений  $n_a$  и  $\Delta\sigma$  был проведен десорбционный цикл (рис. 1, б). При этом монотонный и симбатный характер изменения  $n_a$  и  $\Delta\sigma$  сохранялся; обратимая часть  $n_a$  и  $\Delta\sigma$  составила только 15% от исходных величин. Для достижения первоначального состояния поверхности требовался небольшой подогрев образца ( $\sim 70^\circ\text{C}$ ).

В процессе хемосорбции акцепторных молекул  $NO_2$  происходит непрерывное изменение всего спектра поверхностных состояний и смещение электронного равновесия в системе поверхностные уровни — зоны [3]. Судя по кривым на рис. 1, время восстановления электронного квазиравновесия достаточно мало по сравнению с временем установления адсорбционного равновесия. Это было подтверждено и независимым опытом: при приложении внешнего электрического поля к пленке по обычной методике эффекта поля мы не обнаружили никакой релаксации  $\Delta\sigma$ , которая свидетельствовала бы о перезарядке поверхностных уровней. Одной из возможных причин этого является отсутствие окисной пленки на поверхности PbS, обработанного в идентичных условиях [4]. На необезгаженной поверхности в эффекте поля наблюдается медленная релаксация  $\Delta\sigma$ , как и в [5]. В этом случае на кинетической кривой  $\Delta\sigma$  имеется спадающий участок, в то время как вид кривой  $n_a$  остается прежним. При таком состоянии поверхности нарушается условие существования электронного равновесия в процессе адсорбции.

Помимо исследования кинетических характеристик хемосорбции нами были проведены измерения зависимости стационарных значений  $\Delta\sigma$  от  $n_a$  (рис. 2) в диапазоне давлений от  $10^{-4}$  до 10 мм рт. ст. В области сравнительно малых заполнений (до  $1 \cdot 10^{14}$  мол.см<sup>-2</sup>) выполняется линейная связь между  $\Delta\sigma$  и  $n_a$ , в согласии с теоретическими соотношениями, полученными в [6]. Пользуясь тем, что в этом интервале  $\Delta\sigma$  зависимость ее от индуцированного заряда в эффекте поля линейна, мы оценили концентрацию молекул, хемосорбированных в заряженной форме. Оказалось, что доля ее составляет только 5% от общего количества адсорбированных молекул. При больших заполнениях наступает отклонение от линейности, причина которого скорее всего связана с приближением уровня Ферми на поверхности к середине запрещенной зоны (это соответствует минимуму на кривой  $\Delta\sigma$  в эффекте поля), а также, возможно, перезарядкой исходных уровней [3]. Следует отметить, что даже при максимальных

величинах  $n_a$  не происходила инверсия  $\Delta\sigma$ , а в эффекте поля на образце с тем же исходным состоянием поверхности не удавалось приблизиться к минимуму. Это свидетельствует об очень высокой плотности поверхностных состояний биографического происхождения.

Авторы выражают глубокую благодарность В. Ф. Киселеву за обсуждение результатов этой работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бажанова А. Е., Савельева З. И. «Журн. физ. химии», **43**, 1618, 1969.
2. Звездинский К. В., Зарифьянц Ю. А., Попик Ю. В. Тонкие полупроводниковые пленки. Тезисы докладов совещания. Ужгород, 1966.
3. Киселев В. Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках. М., «Наука», 1970.
4. Хоанг А. Т., Зырянов Г. К. Сб. «Вопросы электроники твердого тела», вып. 3. Изд-во ЛГУ, 1970.
5. Нестеренко Б., Пасечник Ю., Снитко О., Фролов О. «Физика твердого тела», **5**, 3199, 1963.
6. Сандомирский В. Б. «Изв. АН СССР», сер. физич., **21**, 2111, 1957.

Поступила в редакцию  
10.4 1971 г.

Кафедра общей физики  
для химического факультета

УДК 534.121.014.2:533.601.155

В. П. КАНДИДОВ, С. С. ЧЕСНOKОВ

## СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТА ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ НА ПРИМЕРЕ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ

Метод конечных элементов [1] в настоящее время широко используется для расчета консервативных распределенных систем. В настоящей работе метод применяется к решению неконсервативной задачи упругой устойчивости. Результаты расчета сравниваются с данными, полученными экспериментальной в [2].

В работе [2] методом электромеханического моделирования исследуются колебания прямоугольной консольной пластины под действием трех сосредоточенных сил (рис. 1). В точке  $a$  приложена подъемная сила  $P_a$ , направленная перпендикулярно плоскости чертежа и пропорциональная углу атаки  $\left. \frac{\partial \omega}{\partial y} \right|_s$  в точке  $s$

$$P_a = K \left. \frac{\partial \omega}{\partial y} \right|_s, \quad (1)$$

где  $\omega(x, y, t)$  — смещение пластины, перпендикулярное плоскости чертежа.

В точках  $e$  и  $f$  приложены демпфирующие силы

$$P_e = C \left. \frac{\partial \omega}{\partial t} \right|_e, \quad P_f = C \left. \frac{\partial \omega}{\partial t} \right|_f. \quad (2)$$

В точке  $d$  помещена добавочная масса. Устойчивость пластины исследована при двух значениях массы  $m_1$  и  $m_2$ .

Пластина имеет параметры: жесткость  $D = 1,6986 \times 10^3$  нм, плотность  $\rho = 2,7 \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, толщина  $h = 0,00635$  м,  $L = 0,3937$  м,  $B = 0,2540$  м,  $H = 0,3048$  м,  $A = 0,0762$  м,  $\lambda = \beta = 0,01587$  м,  $x_{as} = 0,01905$  м,  $m_1 = 0,1587$  кг,  $m_2 = 0,2268$  кг, коэффициент демпфирования  $C = 7,00$  нм/сек.

В [2] приведены критические значения коэффициента  $K$  и частоты колебаний пластины  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ , полученные экспериментально.

В настоящей работе устойчивость пластины исследуется методом конечных элементов. Выражения для матриц жесткости элементов взяты из [1]. При получении