

- [4] *Gresslehner K.H., Yantsch W., Lischka K., Palmatshofer L.* // *Physica of Narrow Gap Semiconductors*. Warszawa: Polishsci. Publ. 1978. P. 205-210.
- [5] *Смирский Ю.М., Фирсова Л.П., Зломанов В.П.* // *ДАН СССР*. 1979. Т. 247. № 6. С. 1395-1399.
- [6] *Зломанов В.П., Гаськов А.Н.* // *Рост полупроводниковых кристаллов и пленок*. Новосибирск: Наука, 1984. С. 116-133.
- [7] *Зломанов В.П., Новоселова А.В.* *P-T-x*-диаграммы состояния систем металл-халькоген. М.: Наука, 1987.
- [8] *Schenk M., Berger H., Kimakov A.* // *Cryst. Res. and Technol.* 1988. Vol. 23. N 1. P. 77-84.
- [9] *Dlubeck G., Krause R., Mülberg M., Schenk M.* // *Phys. St. Sol. A*. 1987. Vol. 102. N 2. P. K67-K70.
- [10] *Сизов Ф.Ф.* // *Изв. АН СССР. Неорганич. матер.* 1988. Т. 24. № 12. С. 1972-1976.
- [11] *Фреих Д.М., Галушак М.А., Межиловская Л.И.* *Физика и технология полупроводниковых пленок*. Львов: Выща школа, 1988. 152 с.
- [12] *Крегер Ф.* *Химия несовершенных кристаллов*. М.: Мир, 1969. 654 с.

02;10;12
© 1994 г.

Журнал технической физики, т. 64, в. 11, 1994

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ КЛАСТЕРОВ В ПОСТОЯННОМ И ПЕРЕМЕННОМ НЕОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

А.П.Бесоногов, А.В.Бонштедт, С.В.Кузьмин

Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН,
426001, Ижевск, Россия
(Поступило в Редакцию 17 июня 1992 г.
В окончательной редакции 18 января 1994 г.)

Одним из основных способов, используемых в современной масс-спектрометрии, является способ пространственного разделения частиц, ионов с учетом отношения их масс и зарядов. Заряженные или ионизированные частицы, проходя через отклоняющую систему, фиксируются в различных точках регистрирующего устройства. Известны масс-спектрометры типа "ионной ловушки", позволяющие регистрировать различные ионы за счет удержания в постоянном и переменном электрических полях с гиперболическим распределением потенциала [1]. Время удержания ионов в таких ловушках может достигать нескольких суток. Указанный метод можно применить и для удержания заряженных дисперсных частиц, кластеров, полученных плазмодинамическим способом с целью их регистрации и последующего разделения по массе.

Для расчета параметров полей, обеспечивающих устойчивое удержание, рассмотрим динамику отдельной частицы в аксиально-симметричных постоянном и переменном неоднородных электрических полях и поле силы тяжести. Аппроксимируем распределение полей в области удержания квадратичными функциями координат. С учетом уравнения Лапласа запишем выражения для кинетической и потенциальной энергии

$$T = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2),$$

$$U = -\frac{q}{2}(2z^2 - x^2 - y^2) \cdot (E_0 + E_1 \cos \omega t) + mgz. \quad (1)$$

Здесь m, q, x, y, z — масса, заряд и координаты частицы; E_0 — напряженность постоянного электрического поля; E_1, ω — напряженность и частота переменного поля; g — ускорение свободного падения. Далее, вводя обозначения

$$\delta = \frac{4qE_0}{mz_0^2\omega^2}, \quad \varepsilon = \frac{2qE_1}{mz_0^2\omega^2}, \quad \alpha = \frac{4\eta}{mz_0^2\omega^2}, \quad G = \frac{4g}{z_0\omega^2},$$

$$x_1 = \frac{x}{z_0}, \quad x_2 = \frac{y}{z_0}, \quad x_3 = \frac{z}{z_0}, \quad \omega t = 2\tau, \quad (2)$$

где z_0 — межэлектродное расстояние на оси симметрии, и используя лагранжев формализм, запишем уравнения движения

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\alpha\dot{x}_1 + \delta x_1 + 2\varepsilon x_1 \cos 2\tau &= 0, \\ \ddot{x}_2 + 2\alpha\dot{x}_2 + \delta x_2 + 2\varepsilon x_2 \cos 2\tau &= 0, \\ \ddot{x}_3 + 2\alpha\dot{x}_3 - 2\delta x_3 - 4\varepsilon x_3 \cos 2\tau &= -G. \end{aligned} \quad (3)$$

В этих уравнениях α — диссипативный член, обусловленный динамической вязкостью η газовой среды. Как видно из выражения (3), уравнения движения представляют собой систему из трех уравнений Матье, причем последнее уравнение неоднородное. Первые два уравнения идентичны в силу аксиальной симметрии полей, однако переход к цилиндрической системе координат неудобен ввиду появления нелинейного центробежного члена в уравнении для ρ . Исходя из свойств решений уравнения Матье, будем искать решение системы (3) в виде

$$x_i = \sum_{n=0}^{\infty} [x_{i(2n-1)} \sin(n\tau) + x_{i(2n)} \cos(n\tau)]. \quad (4)$$

Выражение (4) описывает режим установившихся колебаний при наличии параметрического возмущения.

Для нахождения устойчивых решений применим методику усреднения, описанную в [2]. Полагаем, что x_{ij} — медленно меняющиеся амплитуды, т.е. частота изменения амплитуд много меньше собственной частоты колебаний ω . В результате усреднения получается система "укороченных" уравнений

$$\dot{x}_{ij} = F_{ij}(x_{ij}, \dots, x_{k1}, \delta, \varepsilon, G). \quad (5)$$

Стационарные точки определяются из решения системы уравнений

$$F_{ij} = 0. \quad (6)$$

Для проверки устойчивости решений, соответствующих найденным значениям, проводится решение системы (5) в вариациях, вычисляются корни характеристического полинома либо используется критерий Рауса-Гурвица для коэффициентов полинома [3].

На базе метода усреднения разработан пакет прикладных программ "ОПУС-К", написанный в среде системы аналитических вычислений "Reduce" [4]. Пакет программ предназначен для нахождения устойчивых периодических решений систем линейных и нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, в том числе и периодически возмущенных [5]. При работе с пакетом вводится число переменных, степень нелинейности, номера и число выбранных гармоник ряда (4) значения коэффициентов при соответствующих переменных или произведениях переменных в уравнениях. В результате работы пакета аналитически вычисляется система укороченных уравнений для выбранных гармоник, вариационная матрица. Определяются стационарные точки, для найденных значений вычисляется характеристический полином.

Ограничимся в расчетах тремя первыми гармониками ряда (4). Тогда $n = 3$ и стационарные точки

$$x_{30} = \frac{G [(\delta + 2)^2 + 4\alpha^2]}{2 \{(\delta + 2) [\delta(\delta + 2) - 8\varepsilon^2] + 4\delta\alpha^2\}},$$

$$x_{33} = \frac{4\alpha\varepsilon G}{(\delta + 2) [\delta(\delta + 2) - 8\varepsilon^2] + 4\delta\alpha^2}, \quad x_{34} = \frac{-2\varepsilon G(\delta + 2)}{(\delta + 2) [\delta(\delta + 2) - 8\varepsilon^2] + 4\delta\alpha^2}, \quad (7)$$

остальные $x_{ij} = 0$.

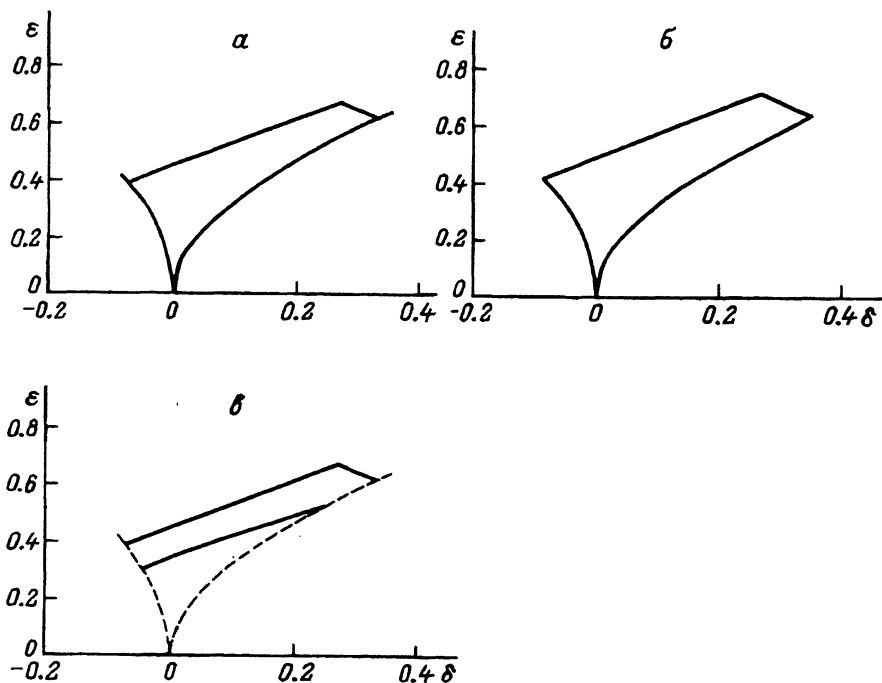
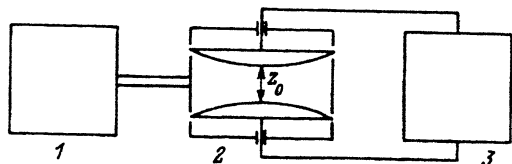


Рис. 1. Области устойчивого взвешивания.

Рис. 2. Схема установки.



Для того чтобы частица удерживалась в области взвешивания, необходимо выполнение условия

$$\left(|x_{30}| + \sqrt{x_{33}^2 + x_{34}^2} \right) < 1. \quad (8)$$

Кроме этого, должна быть обеспечена положительность коэффициентов характеристического полинома и соответствующих определителей Рауса-Гурвица. На рис. 1 приведены области значений δ и ε , удовлетворяющие указанным условиям, для различных значений α и G ($a - \alpha = G = 0$; $b - \alpha = 0.1$, $G = 0$; $e - \alpha = 0$, $G = 0.1$).

Взвешивание осуществляется следующим образом. Будем считать, что кластеры на выходе плазмодинамической установки имеют сферическую форму. Таким образом, заряд кластеров пропорционален площади поверхности, а масса пропорциональна объему. Следовательно, более тяжелым кластерам соответствует меньшее значение q/m , а также δ и ε . При заданных значениях параметров полей E_0 , E_1 , ω , G устойчиво взвешиваются лишь те кластеры, параметры δ и ε которых находятся в области устойчивости.

На рис. 2 показана схема установки. Кластеры с выхода плазмодинамической установки попадают в ловушку 2, образованную двумя гиперболами вращения, на которые из блока питания 3 подается постоянное и переменное высокое напряжение. Под действием электрических полей и диссипации кластеры движутся к центру ловушки и колеблются вблизи точки x_{30} с частотой поля ω . При этом более тяжелые кластеры имеют более низкие точки взвешивания.

Если провести на графике области устойчивости (рис. 1) рабочую линию $\varepsilon = k\delta$, то точки на ней соответствуют кластерам с различной массой при фиксированных параметрах полей. Меняя наклон рабочей линии k , определяющийся отношением E_1/E_0 , можно взвешивать

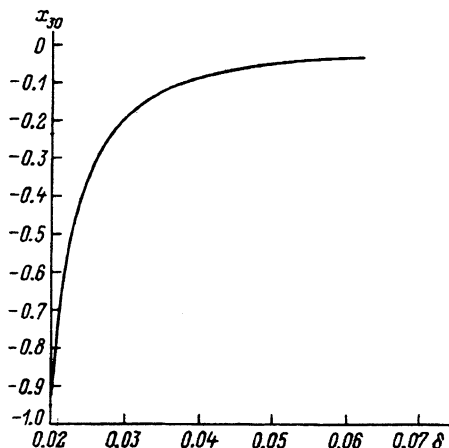


Рис. 3. Зависимость величины точки взвешивания от δ .

кластеры в узком диапазоне масс. На рис. 3 показана зависимость величины точки взвешивания от δ на рабочей линии $k = 8$.

Кластеры с массами, не попадающими в диапазон взвешивания, фиксируются на электродах: легкие — на верхнем, тяжелые — на нижнем электроде, смещаясь под действием переменного поля на края электродов, откуда происходит их удаление.

Для кластеров, состоящих из 10–100 атомов Fe или Ni, требуются следующие значения напряжений, обеспечивающие устойчивое взвешивание при расстоянии между электродами на оси симметрии 0.05 м: а) постоянное напряжение $U_0 =$ от 200 до 1 кВ, б) переменное напряжение $U_1 =$ от 2 до 10 кВ, в) частота переменного напряжения $\omega = 100$ кГц.

Используя регулирование амплитуд постоянного и переменного напряжения можно плавно менять наклон рабочей линии, что позволяет выбрать нужный диапазон удерживаемых масс.

Список литературы

- [1] Шерепов Э.П., Зенкин В.А. // ПТЭ. 1971. № 1. С. 166–168.
- [2] Найфэ А.Х. Введение в методы возмущений. Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
- [3] Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
- [4] Гурин Н.И., Скоморозов А.Г. Аналитические вычисления в системе REDUCE. Справочное пособие. Минск: Наука и техника, 1989.
- [5] Дубровский А.С., Кузьмин С.В. и др. // Тез. и докл. Всесоюз. конф. Аналитические преобразования на ЭВМ в автоматизации научно-исследовательских работ. Вильнюс, 1990.

06;12
© 1994 г.

Журнал технической физики, т. 64, в. 11, 1994

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ХОЛЛА НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК InSb

А.Г.Веселов, С.Л.Рябушкин, И.Я.Шуллер

Институт радиотехники и электроники РАН, Саратовский филиал,
410019, Саратов, Россия
(Поступило в Редакцию 19 декабря 1993 г.)

Сочетание высокой подвижности в пленках InSb толщиной 0.05–0.1 мкм с достаточно большим поверхностным сопротивлением (несколько килоом на квадрат) делает их практически незаменимыми в ряде применений (усилители, детекторы, конвольверы ПАВ, датчики Холла). Для датчиков Холла применение этих пленок означает резкое увеличение чувствительности вплоть до 1200 В/А·Т. В работе мы предлагаем определенные изменения температуры подложки в момент напыления, позволяющие стабилизировать характеристики пленок и реализовать высокие параметры датчиков. Пленки получались в системе магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере аргона с последующей переплавкой в вакууме под тонким защитным слоем SiO [1].