https://doi.org/10.3176/phys.math.1985.4.14
EESTI NSV TEADUSTE AKADEEMIA TOIMETISED.
FÜÜSIKA * MATEMAATIKA
ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК ЭСТОНСКОЙ ССР. ФИЗИКА * МАТЕМАТИКА
PROCEEDINGS OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF THE ESTONIAN SSR.
PHYSICS * MATHEMATICS
1985, 34, 4

УДК 531.788

Ю. ЛЕМБРА

ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ ВЕКТОРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ФОКА В ТЕОРИИ ВАКУУМНОГО НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК

J. LEMBRA. FOKI FOTOMEETRILINE VEKTORPOTENTSIAAL KILEDE VAAKUMIS VALMISTAMISE TEOORIAS

J. LEMBRA. FOCK'S PHOTOMETRIC VECTOR POTENTIAL IN THE THEORY OF VACUUM DEPOSITION OF LAYERS

(Представил П. Кард)

Вакуумное нанесение пленок широко применяется в современной полупроводниковой технике как в методе эпитаксии молекулярных пучков (см., напр., [1]), так и в методе послойной атомной эпитаксии (см., напр., [2]). При вычислении толщины изготовляемой пленки важно знать поверхностную плотность массы, которая осаждается из источника на подложку. В данном сообщении мы преследуем цель показать, что для решения этой задачи в случае косинусного источника [3], с. 45 можно использовать методы теоретической фотометрии.

Пусть в высоком вакууме имеется плоский косинусный источник, ограниченный контуром (q_e) (см. рис. 1). Единичный вектор нормали ис-

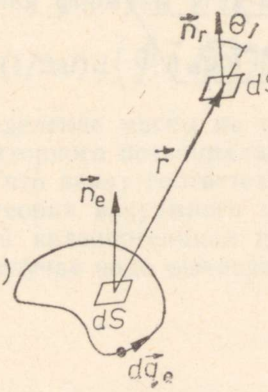

Рис. 1.

точника $\vec{n}_e$ направим в сторону элемента площади подложки dS_r. Если скорость испарения массы Γ является постоянной, то согласно [3] с. 47 поверхностная плотность массы σ_r на элементе площади dS_r выражается в виде

$$\sigma_r = (\Gamma\tau/\pi) \int r^{-2} \cos\varphi \cos\theta \, dS_e, \tag{1}$$

где τ — время испарения, φ и θ — углы испарения и падения соответственно, dS_e — элемент площади источника, r — расстояние между элементами площади dS_e и dS_r.

Косинус угла падения можно представить в форме

$$\cos\theta = \vec{r}\,\vec{n}_r / r, \tag{2}$$

где $\vec{r}$ — вектор, направленный от элемента площади dS_e к элементу площади dS_r, а $\vec{n}_r$ — единичный вектор нормали подложки, направленный от источника (см. рис. 1).

С учетом формул (1) и (2) можно для поверхностной плотности массы σ_r написать

$$\sigma_r = \vec{\sigma}\,\vec{n}_r, \tag{3}$$

где введен вектор

$$\vec{\sigma} = (\Gamma\tau/\pi) \int \vec{r}\, r^{-3} \cos\varphi\, dS_e. \tag{4}$$

Формула (4) аналогична формуле теоретической фотометрии [4] с. 185, по которой вычисляется световой вектор $\vec{E}$ в случае выполнения закона Ламберта

$$\vec{E} = L \int \vec{r}\, r^{-3} \cos\varphi\, dS_e, \tag{5}$$

где L — постоянная яркость. Если световой поток падает на элемент площади dS_r только с одной стороны (как показано на рис. 1), то освещенность E_r на нем определяется из формулы

$$E_r = \vec{E}\,\vec{n}_r. \tag{6}$$

Сравнение формул (4) и (5) показывает, что при переходе от фотометрии к теории вакуумного нанесения пленок имеет место соответствие $L \to \Gamma\tau/\pi$. Если теперь вспомнить, что при выполнении закона Ламберта $L = M/\pi$, где M — светимость, то получим соответствие между светимостью и массой, испущенной с единицы площади источника. Далее, из сравнения формул (3) и (6) вытекает соответствие между освещенностью и поверхностной плотностью массы на подложке.

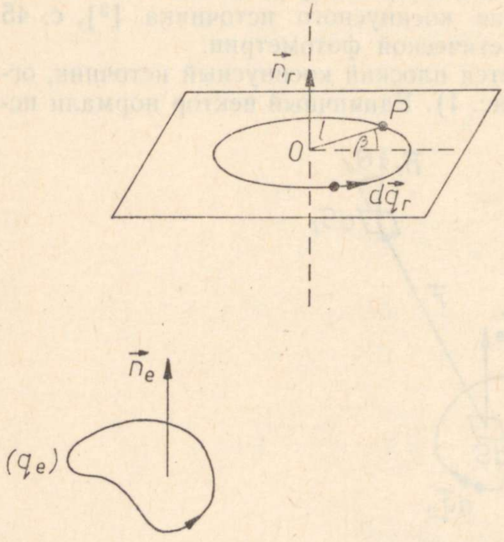

Рис. 2.

Поле, в котором световой вектор определяется по формуле (5), можно описать с помощью фотометрического векторного потенциала Фока [4], с. 191 [5], с. 132. С учетом вышеизложенных соответствий это обстоятельство означает, что

$$\vec{\sigma} = \operatorname{rot}\vec{A}, \tag{7}$$

где векторный потенциал Фока $\vec{A}$ подчиняется формуле

$$\vec{A} = -(\Gamma\tau/2\pi) \oint \ln r\, d\vec{q}_e. \tag{8}$$

В формуле (8) интегрирование идет по контуру источника.

Удобство использования векторного потенциала заключается в том, что двойной поверхностный интеграл, состоящий в формуле (1), заменяется контурным интегралом формулы (8).

Векторный потенциал Фока можно использовать также для анализа новой разновидности метода эпитаксии молекулярных пучков, использующей вращающуюся подложку [6]. Обратимся к рис. 2, где предполагаем, что плоская подложка вращается с постоянной угловой скоростью вокруг оси, проходящей через точку O (назовем ее центром подложки) перпендикулярно к плоскости подложки. Для описания произвольной точки P подложки введем полярные координаты (l, β) с полюсом в центре подложки. Если время испарения намного больше периода вращения подложки, то на ней возникает центрально-симметричное распределение поверхностной плотности массы [7]

$$\bar{\sigma}_r = (1/2\pi) \int_0^{2\pi} \sigma_r \, d\beta. \tag{9}$$

Помножим полученный результат на l и интегрируем

$$\int_0^l \bar{\sigma}_r l \, dl = (1/2\pi) \int_0^l \int_0^{2\pi} \sigma_r l \, dl \, d\beta. \tag{10}$$

Заметим, что в правой части $l dl d\beta = dS_r$. Поэтому из формул (3), (7) и (10) с учетом теоремы Стокса получаем

$$\int_0^l \bar{\sigma}_r l \, dl = (1/2\pi) \oint \vec{A} \, d\vec{q}_r, \tag{11}$$

где в правой части интеграл берется вдоль окружности радиуса l с центром в точке O.

Путем дифференцирования формулы (11) по l находим

$$\bar{\sigma}_r = (1/2\pi l) \, d \left(\oint \vec{A} \, d\vec{q}_r \right) / dl. \tag{12}$$

Это и есть искомое распределение массы на вращающейся подложке, выраженное с помощью векторного потенциала Фока.

В заключение отметим, что ввиду соответствия $M \to \Gamma\tau$ имеется возможность использовать в теории вакуумного нанесения пленок также фотометрический скалярный квазипотенциал плоского источника ([4], с. 78, 143). Однако в этом случае надо вычислять двойной интеграл по поверхности источника.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ржанов А. В., Стенин С. И.* В кн.: Рост полупроводниковых кристаллов и пленок, ч. I. Новосибирск, «Наука», 1984, 5—34.
2. *Айдла А. А., Таммик А.-А. А.* Учен. зап. Тартуск. ун-та, вып. 655, 120—129 (1983).
3. Технология тонких пленок. (Под ред. Л. Майссела и Р. Глэнга) Т. 1. М., «Сов. радио», 1977.
4. *Сапожников Р. А.* Теоретическая фотометрия. М., «Энергия», 1977.
5. *Гуревич М. М.* Фотометрия: теория, методы и приборы. Л., Энергоатомиздат, 1983.
6. *Cho, A. Y., Cheng, K. Y.* Appl. Phys. Lett., 38, 5, 360 (1981).
7. *Лембра Ю. Я., Сиймон Х. В.* Учен. зап. Тартуск. ун-та, вып. 592, 35—46 (1982).

Тартуский государственный университет

Поступила в редакцию 21/III 1985