

Нанофлуктуации в фотонно-силовом микроскопе

Идея задачи заключается в *оценке* сил светового давления. Отдельно стоит отметить слово «оценка». В задаче не требовалось *точно* определить все необходимые значения, хотя такие попытки, конечно, поощрялись.

- 1) Частица, согласно условию, захвачена излучением ИК лазера. При включении зеленого лазера возникают дополнительные силы, смещающие частицу из положения равновесия. Какова природа этих сил? Поскольку поглощение в прозрачном диоксиде кремния ничтожно мало, дополнительные силы могут быть вызваны давлением света при:
 - поглощении в металлических наночастицах;
 - отражении от поверхности диэлектрической сферы.

Частица вращается случайным образом, при этом число серебряных наночастиц, попадающих в луч лазера, флуктуирует. Это и будет вызывать флуктуационные колебания частицы.

Теперь проведем численные оценки. Для начала определим интенсивность зеленого лазера в перетяжке (это значение нам пригодится в дальнейшем):

$$I \approx W / S_1 \approx \frac{10^{-3} \text{ Вт}}{\pi \cdot (0.5E - 6)^2} \approx (1.3E9) \text{ Вт/м}^2 = (1.3E5) \text{ Вт/см}^2, \quad S_1 = (8E - 13) \text{ м}^2,$$

$$P_0 = \frac{I}{c} = \frac{(1.3E9) \text{ Вт/м}^2}{3E8 \text{ м/с}} \approx 4 \text{ Па}$$

- 2) Флуктуации, вызванные броуновским движением:

$$\frac{k_z z^2}{2} \sim k_B T \Rightarrow z \sim \sqrt{2k_B T / k_z} \approx 100 \text{ нм}$$

- 3) Регулярное смещение частицы обусловлено двумя факторами.

- Из-за отражения от диэлектрической поверхности:

$$F_1 = P_1 S_1 \sim \frac{I}{c} 2r S_1 \sim \frac{I}{c} \left(\frac{\Delta n}{n_1 + n_2} \right)^2 S_1 \sim 0.004 \frac{I}{c} S_1 = 0.004 \cdot 4 \text{ Па} \cdot (8E - 13) \approx 0.01 \text{ пН}$$

Эта сила определяется освещенной площадью, контрастом показателей преломления (определяющим коэффициент отражения) и освещенной площадью. Соответствующее смещение – 10 нм – меньше температурных флуктуаций (100 нм).

- Из-за поглощения и рассеяния на металлических частицах:

$$F_2 = P_2 S_2 \sim 0.1 \frac{I}{c} S_1 \sim 0.1 \cdot 4 \text{ Па} \cdot (8E - 13) \approx 0.3 \text{ пН}$$

(0.1 – доля площади поверхности, в среднем покрытая наночастицами).

Поскольку коэффициент отражения примерно равен 0.002, решающий вклад вносит вторая сила, а характерное регулярное смещение равно 300 нм, что превышает температурные флуктуации.

- 4) Определимся теперь с *флуктуациями* частицы в луче лазера.

Поскольку смещение частицы в луче зеленого лазера вызвано главным образом наличием серебряных наночастиц, то флуктуации вызваны случайным изменением их числа в луче при «дрожании» микрочастицы. Считая, что частицы случайно распределены по поверхности, получим оценку для средней флуктуации числа частиц в луче:

$$\delta N = \sqrt{N_1} = \sqrt{0.1 \frac{D_1^2}{d^2}} \approx 0.3 \frac{D_1}{d} \approx 4$$

$$\delta F_{mean} \sim P \delta N S_{nano} \sim 4\pi \frac{d^2}{4} \frac{I}{c} \sim 0.045 \text{ пН}$$

Оценка величины смещения получается 45 нм, что уже сравнимо с температурными флуктуациями.

5) Из предыдущего пункта очевидно, чем вызваны флуктуации. Минимально возможная флуктуация – при изменении числа наночастиц в луче на единицу:

$$\delta F_{min} \sim P S_{nano} \sim \pi \frac{d^2}{4} \frac{I}{c} \sim 0.015 \text{ пН}$$

$$\delta F_{max} \sim P N S_{nano} \sim 0.1 \pi R^2 \frac{I}{c} \sim 0.3 \text{ пН}$$

Смещение, соответственно, 15 нм и 300 нм.

6) Чтобы флуктуации были максимальны, нужно, чтобы все наночастицы собрались «комком», чем равномернее они распределены – тем меньше флуктуации.