

Нанолампы накаливания (16 баллов)

Е.А. Макеева, Т.И. Бидыло

1. Из-за чего обычно «перегорают» лампы накаливания? (0.5 балла)

Из раздела «КПД и долговечность» статьи «[Лампа накаливания](#)» в Википедии: «Время службы лампы накаливания ограничено в меньшей степени испарением материала нити во время работы, и, в большей степени, возникающими в нити неоднородностями. Неравномерное испарение материала нити приводит к возникновению истончённых участков с повышенным электрическим сопротивлением, что, в свою очередь, ведёт к ещё большему нагреву участка нити и интенсивному испарению материала в таких местах, так как мощность в последовательной электрической цепи пропорциональна $I^2 \cdot R$. Таким образом, имеется неустойчивость к утоньшению участков нити. Когда одно из этих сужений истончается настолько, что материал нити в этом месте плавится или полностью испаряется, лампа выходит из строя». Таким образом, процесс перегорания запускают неоднородности толщины нити.

2. Какая лампа накаливания при одинаковой не слишком высокой температуре нити прослужит дольше: с углеродной нитью, с нитью на основе УНТ или на основе графена? Почему? (1 балл)

Дольше всего будет служить самая однородная на наномасштабе нить накаливания.

Наименее однородная – углеродная нить (состоит из отдельных фрагментов графита, полученных в результате обугливания органических материалов, с большим количеством реакционноспособных краев и тонких мест), она выйдет из строя быстрее всего.

В отличие от идеальной боковой поверхности нанотрубок, боковые края графена неидеальны (содержат дефекты, то есть некомпенсированные связи), поэтому будут разрушаться (испаряться) быстрее. К тому же, внутренние слои нанотрубок защищены от внешнего воздействия внешними слоями, поэтому возможное появление со временем дефектов на внешнем слое нанотрубки не ведет к их быстрому распространению внутрь, в то время как возникновение и распространение дефектов внутри листа графена угрожает разрушением всему листу. Поэтому дольше всего прослужит лампа накаливания с нитью на основе нанотрубок.

3. Поясните, можно ли повысить эффективность наноламп накаливания, по аналогии с обычными лампами, используя вольфрамовую нанопроволоку или нанофольгу тех же размеров, что и УНТ или полоска графена? (2 балла)

Поверхность УНТ и листа графена практически не имеет дефектов – все атомы углерода упорядочены системой жестких ковалентных связей и являются валентно насыщенными. В металлах нет таких прочных связей, как в графене, атомы на поверхности удерживаются не так прочно и обладают повышенной энергией и реакционной способностью по сравнению с атомами в объеме металла. Поэтому изготовить атомно точные нанолит и нанопроволоку из вольфрама (на манер графена и УНТ) не получится – они будут обладать большим количеством дефектов и неоднородностей. Более того, нанолиты и нанопроволока из вольфрама (по указанным выше причинам; в отличие от графена и УНТ) будут обладать значительно более низкой температурой плавления, чем «обычная» нить накаливания (см. [«Почему наночастицы плавятся при низкой температуре?»](#)).

Если в обычных лампочках вольфрамовая нить позволила достичь более высокую однородность и лучшие технические характеристики по сравнению с углеродной нитью, то на наномасштабе ситуация полностью противоположная – в нанолампах накаливания металлические материалы проигрывают углеродным.

Как можно видеть на рис. 2а и 3а, в конструкции нанолампочек всегда присутствует некоторый зазор между подложкой и нитью накала.

4. Для чего необходим такой зазор? (1 балл)

Чтобы выделяющееся при прохождении тока тепло шло на нагрев нити накала, а не на нагрев подложки. Например, без зазора КПД графеновой нанолампы уменьшится в 1000 раз.

5. Найдите КПД графеновой лампы (рис. 3с), если мощность ее видимого излучения составляет 1,35 мкВт. (1 балл)

КПД лампочки – это отношение мощности видимого излучения к потребляемой мощности:

$$\eta = \frac{P_v}{U \cdot I} \cdot 100\% = \frac{1,35 \cdot 10^{-6}}{2,5 \cdot 120 \cdot 10^{-6}} \cdot 100\% = \mathbf{0,45\%}$$

Казалось бы, это почти в 5-10 раз меньше, чем КПД обычной 60-100-ваттной лампочки накаливания, но (поскольку КПД ламп накаливания быстро уменьшается с мощностью), сопоставимо с КПД маленькой лампы накаливания на 5 Ватт. Авторы статьи про графеновую нанолампу пишут, что если экстраполировать КПД вольфрамовой лампы накаливания к мощности нанолампы, то КПД последней окажется почти в 10 раз больше!

6. Исходя из параметров графеновой лампы (рис. 3с), оцените потребляемую мощность лампочки из УНТ (рис. 2). (3 балла)

Допустим, каждый слой многослойной УНТ (рис. 2а условия) имеет то же удельное сопротивление, что и лист графена (рис. 3с), тогда:

$$R_G = \frac{U_G}{I_G} = \frac{\rho_G l_G}{S_G} = \frac{\rho_G l_G}{w_G x}, \text{ где } x - \text{условная «толщина» слоя графена.}$$

$$R_{NT} = \frac{\rho_G l_{NT}}{S_{NT}} = \frac{R_G w_G x l_{NT}}{l_G S_{NT}} = \frac{R_G w_G x l_{NT}}{l_G \pi d_{NT} \cdot 11x} = \frac{U_G w_G x l_{NT}}{I_G l_G \pi d_{NT} \cdot 11x} \quad (\text{представляем УНТ как лист графена шириной в 11 разверток УНТ, разницей диаметров разверток разных слоев пренебрегаем}).$$

графена шириной в 11 разверток УНТ, разницей диаметров разверток разных слоев пренебрегаем).

$$P_{NT} = \frac{U_{NT}^2}{R_{NT}} = \frac{11 U_{NT}^2 I_G l_G \pi d_{NT}}{U_G w_G l_{NT}} = \frac{11 \cdot 5^2 \cdot 120 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 13 \cdot 10^{-9}}{2,5 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,4 \cdot 10^{-6}} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$$

Иными словами, потребляемая мощность нанолампочки (150 мкВт) на основе УНТ в 2 раза меньше потребляемой мощности графеновой нанолампы.

Представьте себе, что нить накала в лампочке на рис. 1а заменили на УНТ такой же длины, как и углеродная нить, но по остальным параметрам трубки аналогичную использованной в нанолампе (рис. 2).

7. Почему такая лампа не заработает от сети 220 В и можно ли будет заставить ее работать без изменения конструкции? (2 балла)

Как сказано в условии, волосок лампы Эдисона в 10^5 раз* (100 000) длиннее. Если мы во столько же раз «удлиним» нанотрубку из нанолампочки (рис 2), ее сопротивление увеличится пропорционально, в 100 000 раз. Одновременно мы поднимаем напряжение питания с 5 В до 220 В – в 44 раза. Потребляемый ток (по сравнению с нанолампой) уменьшается в 23 000 раз. Очевидно, такой силы тока не хватит для разогрева до свечения нити накаливания: это как пытаться «запитать» лампу на 220 В от маленькой батарейки. Чтобы нить накала засветилась, необходимо в тысячи раз увеличивать напряжение питания, но сделать это, не изменяя конструкцию, не получится: контакты в патроне питания расположены слишком близко (вспомним, какие большие расстояния должны быть между проводами в многокиловольтных ЛЭП). Чтобы лампа с УНТ работала от 220 вольт надо менять предложенную конструкцию: либо делать более толстую нить накала, состоящую из тысяч нанотрубок, либо уменьшать ее длину.

*В html версии условия задачи (но не в pdf) потерялось форматирование, и 10^5 превратилось в 105. Тем, кто считал соотношение длин 105 вместо 10^5 , баллы не снижались.

8. Объясните причину наблюдаемых особенностей спектра реальной графеновой нанолампочки. (1 балл)

Часть светового потока, излучаемая в направлении подложки, отражается от нее и, проходя через прозрачный графен, интерферирует с излучаемым в противоположную сторону светом. Если разность хода ($2\mathbf{d}$, где \mathbf{d} – расстояние между графеном и подложкой) составляет четное число полуволен ($2\mathbf{d} = 2\mathbf{n}\lambda/2$), то будет наблюдаться максимум, если нечетное ($2\mathbf{d} = (2\mathbf{n}-1)\lambda/2$) – минимум.

9. Что и как ученые изменили в конструкции чтобы спектр нанолампы стал таким, который отмечен на рисунке 4b вопросом? (1.5 балла)

Сравнивая рис. 4а с рис. 4б, мы видим, что отмеченный вопросом спектр графеновой нанолампы соответствует расчетному спектру графена при отсутствии интерференции. Значит, ученые как-то «убрали» интерференцию. Для этого можно сделать глубину зазора очень большой, либо (как и сделали ученые) уменьшить глубину зазора так, чтобы первый интерференционный минимум и максимум не попадали в коротковолновую часть спектра: $\mathbf{d} \ll \lambda/4$ (или, подставляя в п.10 $E_{\min} = 1.2$ эВ, можно найти $\mathbf{d} \ll 250$ нм).

10. Оцените расстояние между графеном и подложкой в нанолампе на рис. 4b. (3 балла)

Для начала запишем формулу перевода энергии фотонов в длину волны:

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E, \quad \lambda(\text{nm}) = \frac{h(\text{eV}) \cdot c(\text{nm})}{E(\text{eV})} = \frac{4,14 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^{17}}{E(\text{eV})} = \frac{1242}{E(\text{eV})}.$$

По графику (рис. 4b условия), расстояние между первым и вторым интерференционными максимумами составляет примерно 0,6 эВ. Это расстояние отвечает удвоенной глубине зазора (см. п.8), следовательно:

$$\mathbf{d} = \frac{\Delta\lambda}{2} = \frac{1242}{2\Delta E} = \frac{1242}{2 \cdot 0,6} = 1035 \text{ нм}.$$