

НАНОТЕХНОЛОГИИ И КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

Во все времена новые технологии способствовали развитию науки. Не являются исключением и нанотехнологии. Это новое научно-прикладное направление позволяет выявить фундаментальные свойства материи на нанометровых масштабах и использовать их для создания новых типов устройств. Например, экспериментальные исследования движения электронов с применением зондовых нанотехнологий показали, что наряду с классической кинетической энергией частицы переносят дополнительную энергию – энергию квантовой нелокальности движения [1, 2]. Это явление можно использовать для создания принципиально новых эффективных устройств охлаждения.

Начнем издалека. В начале прошлого века были проведены эксперименты, результаты которых не укладывались в понятия классической физики и которые привели впоследствии к рождению квантовой физики. В квантовой механике было введено понятие волновой функции, которая сама по себе не имеет физического смысла, но, тем не менее, позволяет описать эволюцию квантовых систем во времени, а квадрат модуля волновой функции имеет смысл плотности вероятности нахождения частицы в заданной точке. Но есть и другой подход к описанию движения квантовых частиц. Впервые его предложил Е.Маделунг. В 1926 году, после публикации Э.Шредингером своего уравнения, он опубликовал уравнения движения квантовой частицы в физических переменных, которые имели квазигидродинамический вид. Одно из двух уравнений было нелинейным. Тогда публикация прошла практически незамеченной. Уже позже, в 50-х годах XX века, к этой работе вернулся американский физик Д.Бом, который в то время занимался развитием квазигидродинамического представления для описания квантовых систем [3]. С тех пор нелинейный метод описания движения квантовых частиц с помощью величин, имеющих физический смысл, оказался наиболее приемлемым для квантовых систем, совершающих инфинитное (неограниченное хотя бы в одном направлении) движение. Например, при численных расчетах рассеяния квантовых частиц удобнее всего использовать квазигидродинамическое представление [4].

В.Неволин, д. ф.-м. н.

Из решения системы квазигидродинамических уравнений можно получить следующее выражение для энергии квантовой частицы:

$$E = p^2/2m + \Delta\epsilon, \Delta\epsilon = (\delta p)^2/2m. \quad (1)$$

По сравнению с классической физикой, в выражении для E появляется дополнительное слагаемое $\Delta\epsilon$, которое назовем энергией квантовой нелокальности движения; δp есть величина флуктуаций импульса частицы.

Таким образом, при свободном движении, согласно выражению (1), помимо кинетической энергии, частицы переносят энергию квантовой нелокальности движения. Иначе говоря, частица одновременно совершает два движения – квантовое и поступательное.

В конечном счете, использование квазигидродинамического представления оправдано, если получены новые результаты, которые подтверждаются экспериментально.

Дело за малым: осталось придумать и осуществить эксперимент, который показывал бы, что квантовые частицы, совершающие инфинитное движение, переносят наряду с кинетической энергией еще и энергию квантовой нелокальности движения в соответствии с формулой (1).

Нами были поставлены эксперименты с применением зондовых нанотехнологий по туннелированию электронов из катода (острийного зонда) через треугольный барьер при автоэлектронной эмиссии [1, 2]. Туннелирующие электроны уносят из катода энергию Ферми, добирают кинетическую энергию во внешнем поле между электродами и доставляют ее на анод. Именно энергия Ферми электронов катода и переходит в данном случае в энергию квантовой нелокальности движения. Иначе говоря, летящие электроны "на своих плечах" переносят энергию Ферми.

Энергия электрона, вылетающего из катода, в данном случае равна [1]:

$$E = p_1^2/2m + \epsilon_{1f},$$

где ϵ_{1f} – энергия Ферми в катоде.

Кинетическая энергия электрона, попавшего в анод, которая затем переходит в тепло, равна [1]:

$$p_2^2/2m = eU + p_1^2/2m + \epsilon_{1f} - \epsilon_{2f}, \quad (2)$$

где ϵ_{2f} – энергия Ферми в аноде.



Поскольку начальный импульс электрона можно принять равным нулю, из (2) следует:

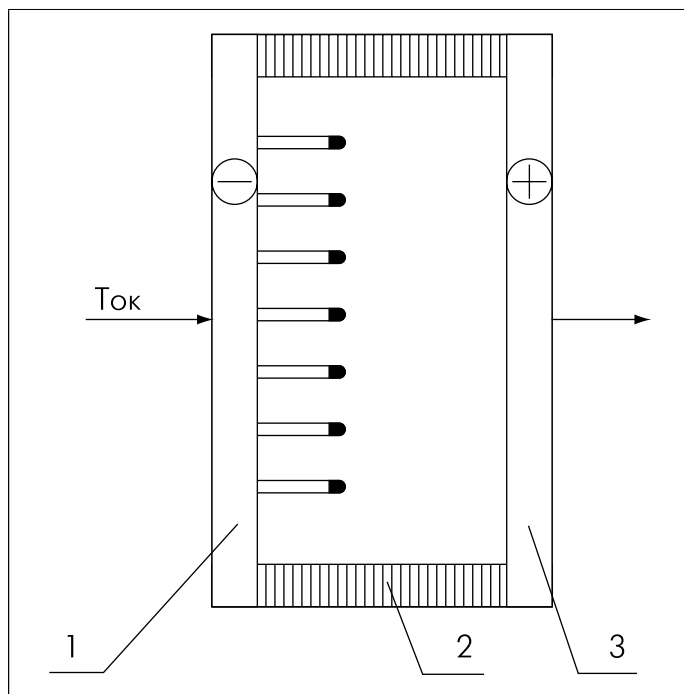
$$p_2^2/2m = eU + \varepsilon_{1f} - \varepsilon_{2f}$$

Относительное тепловыделение в аноде в зависимости от приложенного напряжения будет изменяться по закону

$$\Delta Q/Q = 1 + (\varepsilon_{1f} - \varepsilon_{2f})/eU, \quad (3)$$

где $Q=IU\Delta t$ – джоулево тепло, ΔQ – тепловыделение в аноде с учетом разности энергий Ферми катода и анода. Из формулы (3) видно, что возможно увеличение или уменьшение нагрева анода в зависимости от соотношения энергий Ферми электродов. Если энергия Ферми электронов в катоде превышает энергию Ферми в аноде, то возможно дополнительное тепловыделение в аноде и недогрев анода при обратном соотношении энергий Ферми. Это аналог эффекта Пельтье, только с одним принципиальным отличием: туннелирующие электроны уносят из катода энергию Ферми и переносят ее в пространстве между электродами. Ранее этот эффект не предсказывался и не наблюдался, поскольку эксперименты проводились при больших значениях межэлектродных напряжений, когда эффект исчезающе мал. Характерные значения напряжения между электродами, необходимые для осуществления автоэлектронной эмиссии, составляют 10^6 – 10^7 В/см. В наномасштабах, за счет малого радиуса острия катодов (менее 30 нм), внешнее напряжение удастся понизить до значений порядка нескольких вольт. В этом случае влияние разности энергий Ферми на нагрев анода становится существенным. Именно такие значения U были реализованы в экспериментах [1, 2], и в результате нагрев анода изменился за счет вклада энергий Ферми.

Новые представления о движении квантовых частиц позволяют создать холодильные элементы с невиданным до сих пор теоретическим коэффициентом производства холода – до 60% от затрачиваемой электрической мощности [5]. Наличие зазора между электродами, особенно если оттуда удалить воздух, позволит снизить бесполезный переток тепла – в отличие от известных термоэлектрических преобразователей (состоящих из двух полупроводников с разной проводимостью, тесно соединенных между собой). Такие холодильные элементы можно сделать только с применением нанотехнологий. В них катод (см. рисунок) представляет собой проводящий электрод с расположенными перпендикулярно его поверхности углеродными многостенными нанотрубками, на концах которых имеются никелевые наконечники. Анод покрыт графитовой проводящей пленкой и отделен от катода электротеплоизолирующей вставкой. Диаметр углеродных нанотрубок не должен превышать 30 нм. Расстояние между нанотрубками должно быть не меньше половины их высоты. Расстояние между электродами может составлять многие микроны. Чем больше количество нанотрубок на единицу площади катода, тем больше холода производится в расчете на ту же площадь. Холодильные устройства, изготовленные с применением нанотехнологий, могут быть востребованы



Схематический вид автоэмиссионного холодильного элемента:

1 – катод с углеродными нанотрубками; 2 – изолятор;

3 – анод с углеродным проводящим покрытием

в самом широком спектре приложений – от плат электронных приборов до бытовых холодильников.

Отметим, что наличие энергии квантовой нелокальности у частиц, совершающих инфинитное движение, должно иметь место и в других явлениях, например при туннелировании заряженных частиц из ядер. В частности, при альфа-распаде заряженные частицы помимо кинетической энергии должны уносить энергию квантовой нелокальности движения, которую можно измерить как разность между полной энергией частиц, термолизуемых в среде с заданными свойствами, и кинетической энергией налетающих частиц. Наличие заряда позволяет измерить величину тока и кинетическую энергию частиц в поперечном магнитном поле.

При изучении альфа-распада еще в 50-х годах прошлого века было доказано, что для совпадения экспериментальных значений энергии вылетающих из ядер альфа-частиц с теор-

ретическими нужно полную энергию частиц представлять в виде суммы с некой добавкой:

$$E = E_k + \delta E.$$

Величина этой добавки δE так и осталась загадкой. Для соответствия эксперименту для нее придумана эмпирическая формула [6]. Были предприняты различные теоретические оценки этой величины, однако достоверность этих оценок экспериментально проверить весьма трудно. В нашем случае δE имеет принципиально другой смысл – это энергия квантовой нелокальности движения, уносимая из ядра, которая может быть измерена [7].

Таким образом, отказ от описания квантовых систем на языке физических переменных, принятый в 30-х годах прошлого века, и предпочтение, отданное волновым функциям, привели, на наш взгляд, к некоторым потерям для физики инфинитного движения квантовых частиц, не до конца еще осозанным.

Великий Луи де Бройль, написавший в молодости выражение для волновой функции свободной квантовой частицы в виде плоской волны, в течение всей своей жизни мучительно пытался найти такую волну-пилота, которая в отличие от волнового пакета была бы устойчивой в пространстве и могла бы наглядно описывать движение квантовых частиц. Однако выпущенного джина из бутылки нельзя было остановить, и победное шествие волновой функции продолжается целую эпоху и будет

продолжаться до тех пор, пока новые эксперименты не заставят серьезно задуматься об уточнении некоторых основ квантовой механики. И такой прогресс, на наш взгляд, невозможен без развития и использования нанотехнологий!

ЛИТЕРАТУРА

1. **Неволин В.К.** Тепловой эффект на аноде при автотермоэлектронной эмиссии. – Письма в ЖТФ, 2006, т.32, вып.23, с.66–72.
2. **Неволин В.К.** Зондовые нанотехнологии в электронике. Изд. 2-е. М.: Техносфера, 2006. – 160 с.
3. Вопросы причинности в квантовой механике. Сб. переводов под ред. Я.П. Терлецкого и А.А. Гусева. – М.: ИЛ, 1955, с.34.
4. **Алексеев Б.В., Абакумов А.И.** Об одном подходе к решению уравнения Шредингера. – ДАН, 1982, т. 262, с. 1100–1102.
5. **Неволин В.К.** Устройство для выделения или поглощения тепла. – Заявка на патент РФ №2008126736 от 28.08.2008.
6. **Давыдов А.С.** Теория атомного ядра. – М.: ФМЛ, 1958, с. 130.
7. **Неволин В.К.** О тепловыделении альфа-источников. – Инженерная физика, 2009, №3, с.10.