

10;11;12

Энергетические распределения электронов, эмитированных из алмазной пленки под действием сильного поля

© С.А. Пшеничнюк, Ю.М. Юмагузин, Р.З. Бахтизин

Башкирский государственный университет

Поступило в Редакцию 26 января 1999 г.

Приведены результаты измерения распределений по полной энергии электронов, эмитированных под действием сильного внешнего поля с поверхности тонкой алмазоподобной пленки, изготовленной методом ионно-лучевого осаждения на вольфрамовом острие. Полученные данные подтверждают предположение об инжекции носителей в зону проводимости пленки и их последующей эмиссии в вакуум.

Неослабевающий интерес к исследованию полевой электронной эмиссии углеродных материалов связан с уникальными эмиссионными свойствами как природного полупроводникового алмаза типа IIb [1], так и различных аморфных углеродных и алмазоподобных пленок, обычно получаемых методами химического осаждения из газовой фазы [2]. Можно считать надежно установленным наличие отрицательного электронного сродства поверхности (111) природного алмаза [1], а также увеличение стабильности тока полевой эмиссии из поверхностей металлов, покрытых алмазоподобной пленкой, по сравнению с поверхностями чистых металлов [3]. Это связано с чрезвычайно высокой химической инертностью алмазной поверхности и малым коэффициентом распыления углеродных материалов под действием ионной бомбардировки [4].

Однако до настоящего времени точно не выяснены механизмы переноса носителей заряда через полупроводящую алмазоподобную пленку под действием сильного ($\sim 10^7$ V/cm) внешнего эмиссионного поля. Ценная информация о зонной структуре алмазоподобного покрытия и эмиссионном процессе может быть получена благодаря исследованию распределений по энергии эмитированных электронов, надежные данные о которых отсутствуют. Целью данного исследования является получение энергетических распределений эмитированных из

поверхности алмазной пленки электронов, измеренных в условиях высокого вакуума с локального эмитирующего участка. В настоящей работе приведены результаты, полученные на острийных вольфрамовых полевых эмиттерах, покрытых тонкой алмазоподобной пленкой.

Острийные эмиттеры, исследованные в данной работе, готовились следующим образом. Из вольфрамовой проволоки диаметром 0.08 mm путем электрохимического травления в водном растворе КОН получали тонкое острие с радиусом кривизны кончика $\leq 1 \mu\text{m}$. Затем острие промывалось в дистиллированной воде, укреплялось на вольфрамовой дужке для возможности прогрева и переносилось в высоковакуумную камеру для напыления алмазной пленки. Остаточный вакуум в камере (не хуже 10^{-9} Torr) получался при помощи средств безмаслянной откачки на основе магниторазрядного насоса ТРИОН НМТО-0.1-1.

Перед осаждением пленки острие прогревалось в вакууме при температуре $\sim 1500^\circ\text{C}$ для удаления адсорбированных загрязнений. Осаждение углеродной пленки производилось методом ионно-лучевого напыления. Сначала острие очищалось бомбардировкой ионами C^+ с энергией 0.5 keV в течение 5 min, затем энергия пучка уменьшалась до значения 100 eV и проводилось осаждение углерода на поверхность острия в течение 80 min. Плотность тока пучка ионов при этом была равной $0.04 \mu\text{A}/\text{mm}^2$. Исходя из величины дозы и времени облучения острия ионами C^+ , оценивалась толщина углеродного покрытия на поверхности W. Она оказалась равной $\approx 15 \text{nm}$.

После напыления острие переносилось в высоковакуумную камеру установки для измерения энергораспределений и вольт-амперных характеристик полевого тока. Рабочий вакуум при исследовании эмиссионных свойств был не хуже 10^{-10} Torr. Для получения распределения эмитированных электронов по полной энергии применялся дисперсионный анализатор, позволяющий настраиваться на отдельный эмитирующий участок на полной эмиссионной картине. Измерение и обработка энергетических распределений эмитированных электронов были автоматизированы с помощью компьютера (Am5 \times 86-P75-S 133 MHz) и модулей в стандарте КАМАК. Установка для исследования эмиссии описана в работе [5].

Непосредственно после установки острия и включения эмиссионного напряжения наблюдалась нестабильная эмиссионная картина, для стабилизации которой острие с пленкой прогревалось до температуры

около 500°С. После этого эмиссия стабилизировалась, однако картина не проявляла признаков симметрии.

На рис. 1, *a* приведена характеристика Фаулера–Нордгейма полного тока острья, покрытого пленкой. Легко заметить нелинейность графика, характерную для эмиссии с полупроводящих или диэлектрических поверхностей [6]. Распределение эмитированных электронов по полной энергии, снятое после вышеупомянутого слабого прогрева, приведено на рис. 2, *a* для нескольких значений эмиссионного напряжения. Характерная особенность графика — наличие двух максимумов, первый из которых, расположенный при значении ≈ -4.5 eV, не испытывает смещения при изменении приложенного напряжения, что характерно для энергораспределений из чистых металлических острий. Для примера на рис. 2, *b* приведено распределение по энергиям, полученное для *W* острия, не покрытого пленкой. Таким образом, этот высокоэнергетический максимум может быть связан с электронами, туннелирующими через тонкую алмазную пленку в вакуум с уровня Ферми металла, что подтверждается также положением этого пика и его полушириной.

Широкий пик, имеющий максимум при значении около -5.9 eV, можно отнести собственно к алмазоподобной пленке. Ширина его, вероятно, определяется тем, что при указанной толщине покрытия и наличия высокого эмиссионного напряжения у его поверхности, поле полностью проникает в пленку, вызывая наклон энергетических зон на протяжении всей толщины пленки. При эмиссии из зоны проводимости углеродного слоя ширина спектра увеличивается с возрастанием приложенного поля, так как увеличивается наклон зон, что и наблюдается на опыте (рис. 2, *a*). Также этот пик испытывает значительный сдвиг при изменении эмиссионного напряжения, что характерно для полупроводниковых эмиттеров. Возможно, что наблюдаемая тонкая структура широкого пика в спектрах обусловлена эмиссией из электронных состояний, связанных с дефектами структуры алмазной пленки [7].

Далее эмитирующее острие подвергалось прогреву до 1300°С с целью удаления напыленного покрытия. Полученное затем энергораспределение приведено на рис. 2, *b*. Видно, что полуширина пика, положение и его малое смещение при увеличении эмиссионного напряжения соответствуют металлическому поведению. Широкий пик, относящийся к пленке, полностью исчез. Об удалении углеродной пленки свидетельствует также вид характеристики Фаулера–Нордгейма

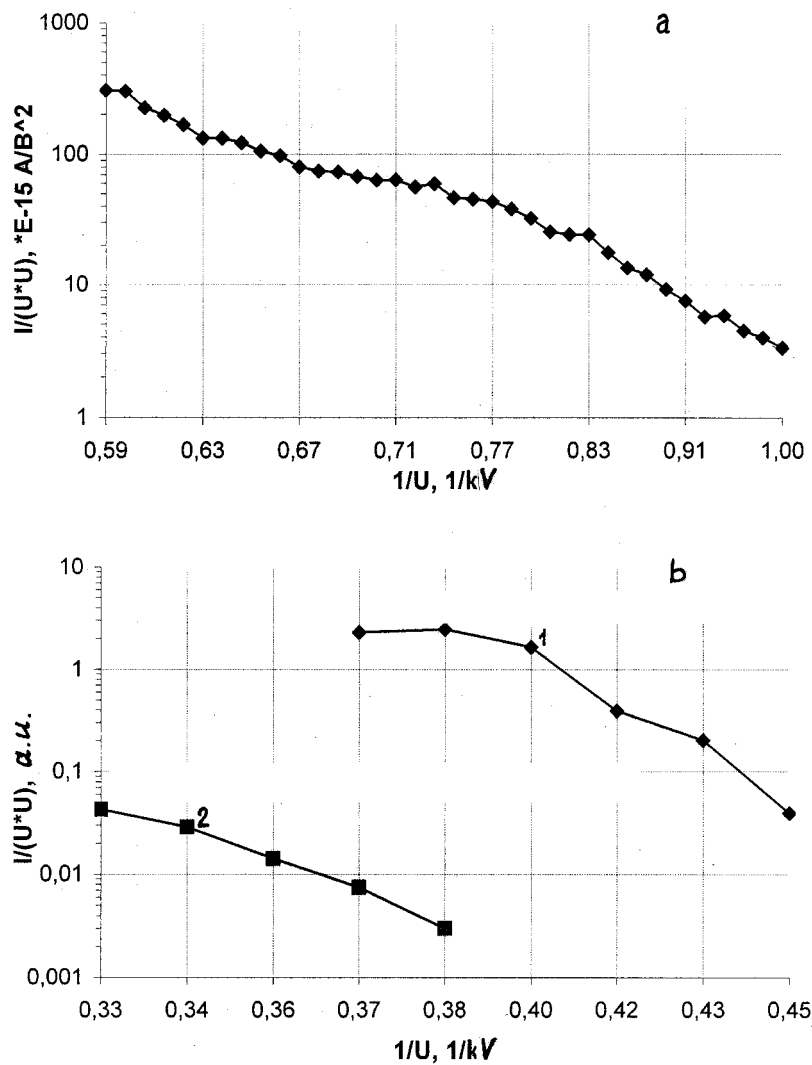


Рис. 1. Характеристики Фаулера–Нордгейма: *a* — полного тока вольфрамового острья с алмазной пленкой; *b* — вольфрамового острья до (1) и после (2) испарения алмазной пленки, измеренные с малого участка.

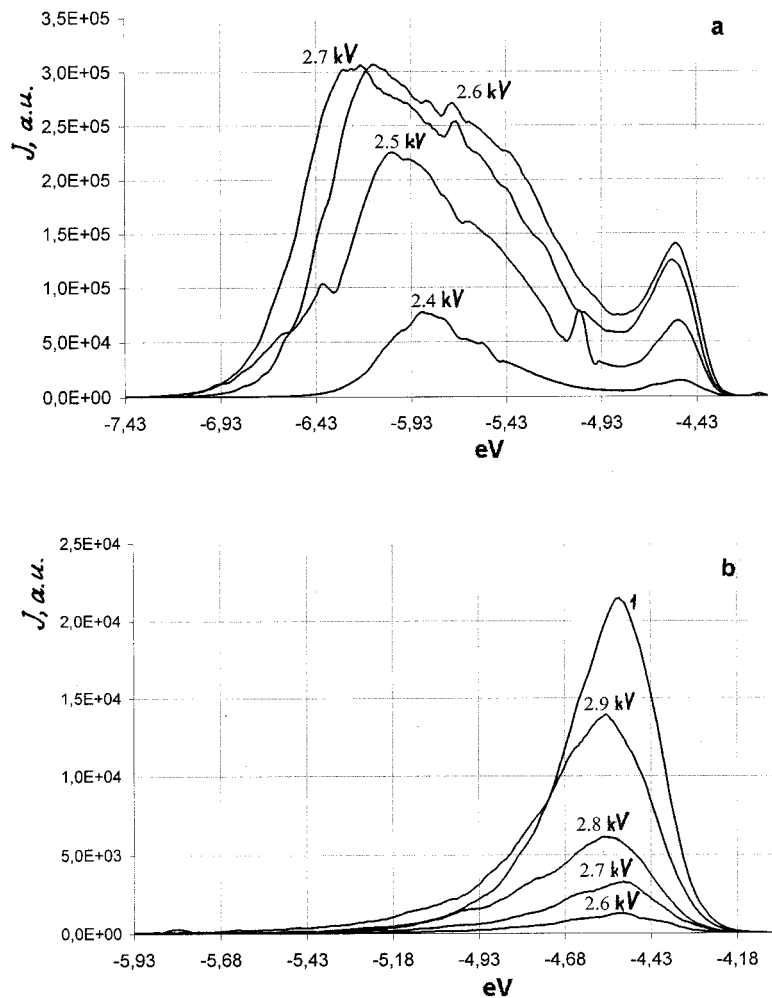


Рис. 2. Энергетические распределения автоэлектронов: *a* — эмитированных с покрытого алмазной пленкой острия, полученные при различных значениях эмиссионного напряжения; *b* — после испарения пленки при различных значениях эмиссионного напряжения (для сравнения приведен спектр с чистого вольфрамового острия (1)).

(рис. 1, *b*), снятой с того же (малого) участка, что и энергораспределение. Заметно, что после прогрева острия эмиссионное напряжение увеличилось. Допуская неизменность геометрической формы острия, что обусловлено малой температурой прогрева по сравнению с температурой плавления вольфрама, можно предположить уменьшение работы выхода поверхности полевого эмиттера при покрытии его алмазной пленкой.

Интересно отметить, что после удаления углеродной пленки эмиссионная картина приобрела симметрию, не соответствующую, однако, общеизвестному изображению "сглаженного" чистого вольфрамового острия. Подобное изображение, названное в работе [8] "ребристым" или "загрязненным углеродом", соответствует виду острия из W с адсорбированными парами высоковакуумного масла, образующимися при применении паромасляных, как в работе [8], насосов. Таким образом, в данном случае некоторое количество углерода остается на острие и не испаряется при довольно высоких температурах (до 2500°C) и приложенных полях, что также отмечено в работе [8].

В заключение нами изготовлены полевые эмиссионные катоды на основе вольфрамового острия, покрытого алмазоподобной пленкой, полученной методом ионно-лучевого осаждения. Проведенные измерения энергораспределений и вольт-амперные характеристики показали наличие на поверхности полупроводящего тонкого слоя, понижающего работу выхода эмиттера и увеличивающего стабильность эмиссии. Удаление этого слоя возможно только при высоких температурах или при "срыве" острия, однако малая часть углерода остается на поверхности.

Список литературы

- [1] *Himpsel F.J., Knapp J.A., Van Vechten J.A.* et al. // *Phys. Rev. B.* 1979. V. 20. P. 624–627.
- [2] *Zhu W., Kochanski G.P., Jin S., Seibles L.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. B 14 (3). P. 2011–2019.
- [3] *Choi W.B., Liu J., McClure M.T.* et al. // *J. Vac. Sci. Technol.* 1996. B 14 (3). P. 2050–2055.
- [4] *Вавилов В.С., Гуппиус А.А., Конорова Е.А.* Электронные и оптические процессы в алмазе. М.: Наука, 1985. 120 с.

- [5] Бахтизин Р.З., Лобанов В.М., Юмагузин Ю.М. // ПТЭ. 1987. № 4. С. 246–248.
- [6] Dadykin A.A., Naumovets A.G., Andreev V.D. et al. // Diam. Relat. Materials. 1996. № 5. P. 771–774.
- [7] Yoshiyuki S., Fumihiko M., Masaharu H. et al. // J. Appl. Phys. 1998. 84 (11). P. 6351–6354.
- [8] Комар А.П., Таланин Ю.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1956. Т. XX. № 10. С. 1137–1141.