

13.2;15

Новые решения для создания перспективных приборов на основе низковольтной полевой эмиссии углеродных наноразмерных структур

© Ю.В. Гуляев, Н.П. Абаньшин, Б.И. Горфинкель, С.П. Морев,
А.Ф. Резчиков, Н.И. Сеницын, А.Н. Якунин

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
ООО „Волга–Свет“, Саратов
ФГУП „НПП Торий“, Москва
Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов
Саратовский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН
E-mail: anyakunin@mail.ru

Поступило в Редакцию 1 февраля 2013 г.

Приведены результаты исследований и примеры практической реализации новых подходов, направленных на решение существующих проблем критичности процессов автоэлектронной эмиссии по отношению к конструктивно-технологическим факторам и открывающих реальные перспективы практического применения углеродных нанотрубок (УНТ) и углеродосодержащих планарно-торцевых автоэмиссионных структур (ПТАС) в экстремальных областях электроники.

На протяжении уже почти двух десятилетий, начиная с момента обнаружения уникальных свойств полевой эмиссии углеродосодержащих структур [1], внимание многих исследователей было направлено на поиск путей практической реализации потенциальных преимуществ автоэлектронных катодов при создании приборов с новым комплексом параметров. К ним относятся безынерционность, энергоэффективность, нечувствительность к ионизирующим излучениям, способность функционировать в широком диапазоне температур (от температуры жидкого азота до 400°С) [2] и др.

Одним из наиболее многообещающих возможных применений холодных катодов, но одновременно и предельно сложных в исполнении, является разработка дисплеев на полевой эмиссии (FED — Field

Emission Display). Экстремальность проблем создания FED связана с необходимостью обеспечения стабильного, интенсивного и однородного токоотбора с большой площади при пространственно-временной адресации видеосигнала, рассчитанной на число пикселей матрицы, достигающего в современных средствах отображения $2 \cdot 10^6$. И если принципиальная возможность создания работоспособного FED на полевой эмиссии УНТ была доказана демонстрацией прототипа еще в 1998 году [3], то к настоящему времени можно констатировать отсутствие каких-либо публичных признаков существования FED, обладающих конкурентоспособными свойствами по сравнению с получившими повсеместное распространение жидкокристаллическими индикаторами.

Анализ многочисленных публикаций, например [4–7], а также результаты собственных исследований [8,9] позволяют выделить несколько причин отсутствия значимых успехов в области развития автоэмиссионной электроники, две из которых можно отнести к фундаментальным. Это, во-первых, сложность обеспечения на развитой поверхности идентичности локального распределения электростатического поля в области острия каждого отдельного элементарного эмиттера. В результате существенной нелинейности известного закона Фаулера–Нордгейма [2] и критичности выражения для плотности тока по отношению к параметру напряженности поля распределение плотности автоэлектронной эмиссии по поверхности катода также становится неоднородным. Существование строчной развертки делает неэффективными возможные алгоритмы и схемы адаптации видеосигнала. Во-вторых, в рабочих режимах эксплуатации приборов на основе УНТ и углеродных наноструктур наблюдается заметная деградация их эмиссионных свойств, приводящая к преждевременному и быстрому ухудшению основных параметров приборов. Универсальными рекомендациями для преодоления этого недостатка являются предложения снижения токовой нагрузки на эмиттер, которое реализуется либо прямым уменьшением плотности тока эмиссии в непрерывном режиме, либо увеличением скважности импульсного тока [5]. При этом считается, что деградация инициируется опять же неоднородностью нагружения элементарных эмиттеров, которые находятся в различающемся по напряженности электрическом поле и при увеличении тока с каждого из них легко переходят в режим взрывной эмиссии, сопровождающейся разрушением эмиттера. С повышения предельно допустимого уровня тока эмиссии активно работают над совершенствованием технологий изготовления УНТ, обеспечивая надежный термический контакт их с высокотеплопроводной

подложкой [7]. Чрезвычайно важной, на наш взгляд, является роль газов остаточной атмосферы в приборе. Ионизация молекул газов ускоренными электронами приводит к появлению ионов, движение которых в электростатическом поле прибора прямо противоположно движению электронов. Результатом этого процесса является фокусировка ионного потока и в конечном счете бомбардировка поверхностей с потенциалом эмиттера. Степень локализации нагрузок при этом может быть очень высокой и поэтому — разрушительной для элементарных эмиттеров [8].

В настоящей работе приводятся результаты решения указанных выше проблем при разработке сложных многокомпонентных устройств, какими являются FED на основе полевой эмиссии УНТ и ПТАС, при одновременном обеспечении высокого уровня качества приборов за счет синтеза и внедрения новых технических решений [10–12].

В FED на основе полевой эмиссии УНТ, разрабатываемом ООО „Волга–Свет“ совместно с „CoryTele, Inc.“ [10], проблема увеличения интегрального автоэмиссионного тока на пиксель была решена формированием массива УНТ с максимальным периметром граничной поверхности. Теоретически [13] и экспериментально [14] было показано, что вклад тока УНТ, находящихся на границе области, в общий ток массива является определяющим. УНТ во внутренней области массива практически не участвуют в формировании интегрального потока. Поэтому в разработанной конструкции FED была принята концепция „рамочного“ построения пикселя — площадка светоизлучающего пикселя с люминофором обрамлялась массивом УНТ в виде тонкого полоска по периметру пикселя. Отношение длины границы „рамки“ к площади пикселя составило $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$, а площадь эмиттера не превысила 6% от площади пикселя. Другим фактором новизны явилось расположение пикселей на разработанной активно-матричной подложке с тонкопленочными транзисторами (AMTFT). Это обеспечило, во-первых, необходимую систему памяти и управления дисплеем; во-вторых, снижение требований к уровню плотности тока эмиссии более чем на два порядка; и в-третьих, уменьшение пиковой мощности нагрузки, обусловленной ионной бомбардировкой УНТ.

Автоэмиссионный катод представлен смесью УНТ, имеющих специальное покрытие, и наночастиц. Это обеспечило рабочий режим при рекордно низких напряжениях 70–80 V с управляющим напряжением не более 40 V. Применение люминофора оригинального состава и близкое расположение эмитирующих нанотрубок к пикселям, расположенным в

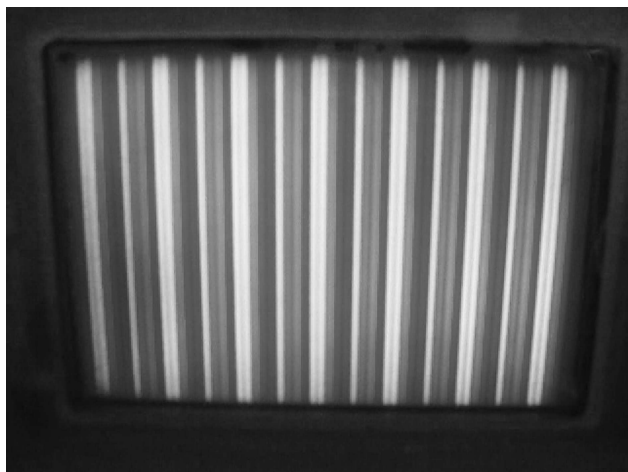


Рис. 1. Образец дисплея на основе полевой эмиссии углеродных нанотрубок.

одной плоскости, наряду с низкими рабочими потенциалами в приборе позволило получить высокую яркость. При этом сеть проводников, покрытых УНТ, и границы пикселей, покрытых люминофором, электрически разделены в пространстве благодаря разработанной технологии прецизионного нанесения покрытий. В монохромном режиме яркость экрана достигает 1000 cd/m^2 , а яркость цветного экрана в белом цвете составляет $250\text{--}300 \text{ cd/m}^2$. Дисплей с диагональю 5.5 дюйма имеет матрицу 320×234 трехцветных RGB пикселей (рис. 1).

Развитая технология потенциально пригодна для создания устройств любых размеров — от миниатюрных мобильных устройств до полноразмерных телевизионных экранов. Изготовление разработанных AMTFT-структур возможно с использованием традиционно применяющейся в массовом производстве полупроводниковых приборов линейки технологического оборудования. Описанные дисплеи на основе полевой эмиссии УНТ обладают всеми характеристиками, присущими дисплеям с электронно-лучевой трубкой. Наряду с обеспечением широкого температурного диапазона, большого угла обзора, высокого контраста и телевизионного времени отклика, дополнительным преимуществом является отсутствие фликкер- и кросс-эффектов.

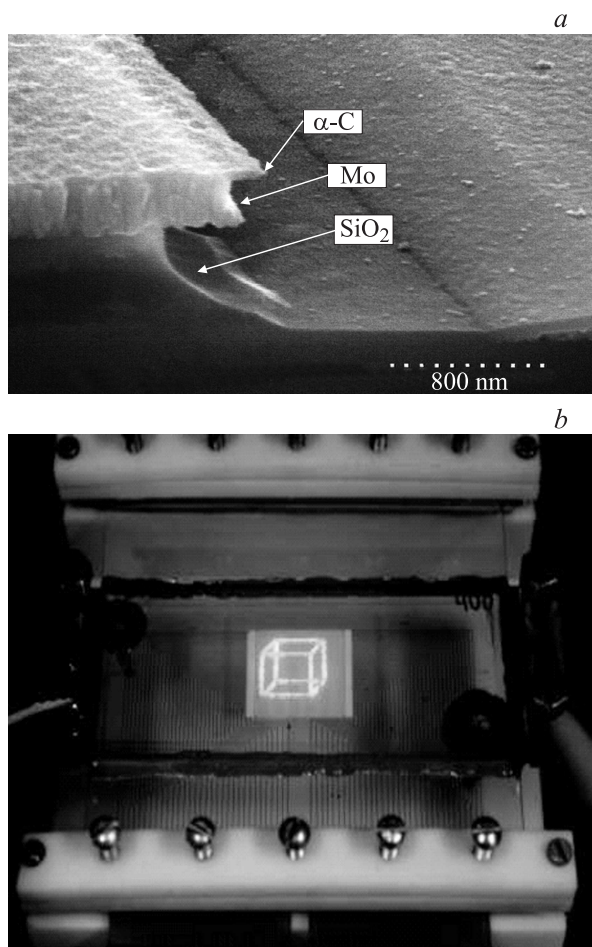


Рис. 2. Автоэмиссионная структура планарно-торцевого типа с эмитирующей пленкой α -углерода (a) и образец дисплея (b) на основе полевой эмиссии структур планарно-торцевого типа.

При построении FED на основе полевой эмиссии в ПТАС [8,11] лезвий γ -углерода (структура показана на рис. 2, a) была использована традиционная схема построчной подачи видеосигнала. Однако совокупность технологических, конструктивных и топологических особенно-

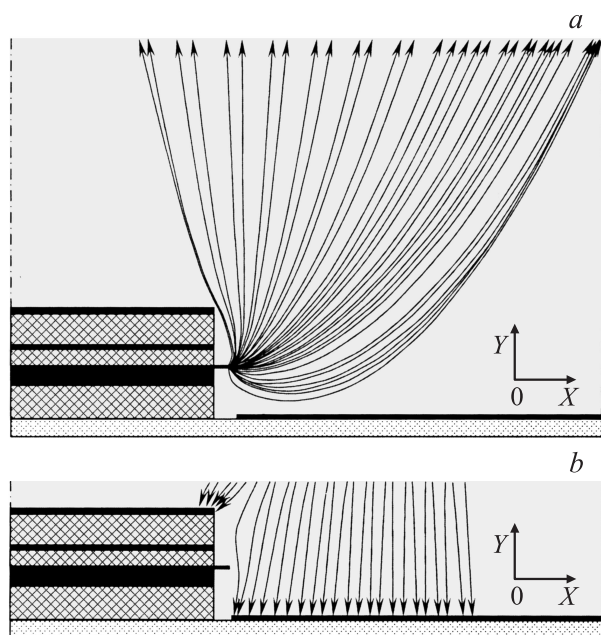


Рис. 3. Формирование электронного (*a*) и ионного (*b*) потоков в усовершенствованной автоэмиссионной структуре планарно-торцевого типа.

стей ПТАС [8] обеспечила необходимый запас по допустимой плотности автоэмиссионного тока и надежную защиту лезвия пленки α -углерода от ионной бомбардировки при эксплуатации в условиях технического вакуума. Технология изготовления ПТАС, формирование всех ее элементов осуществляется с использованием стандартного оборудования планарного цикла методом самосовмещения, поэтому характеризуется высокой стабильностью и воспроизводимостью характеристик. Образце FED на основе ПТАС представлен на рис. 2, *b*. Субмикронное межэлектродное расстояние определило низковольтность управления, максимальная разность потенциалов „эмиттер–управляющий электрод“ не превысила 180 V, а вариация управляющего потенциала — 80 V. Дисплей показал достаточно высокую долговечность — не менее 2000 ч.

Для дальнейшего развития данной конструкции планируется реализация более совершенной структуры для формирования ламинарного

электронного потока и жесткого управления его транспортом на анод [15] с тем, чтобы в 8–10 раз повысить плотность автоэмиссионного тока при прежнем уровне нагрузки на эмитирующее лезвие. В отличие от рассмотренной в работе [8] в данной структуре при формировании рабочего электронного потока не используется дополнительно механизм вторично-электронной эмиссии. Направленный поток автоэлектронов формируется, как показано на рис. 3, *a*, структура электростатического поля делает поток электронов мало критичным к угловому разбросу начальных скоростей электронов и обеспечивает стабильность траекторий. Одновременно реализуется электростатическая защита лезвия автоэмиттера от потока ионов за счет устранения условий для их фокусировки на лезвие. Плоские электроды, имеющие значительную площадь и хорошую теплорассеивающую способность, перехватывают ионы, как показано на рис. 3, *b*. Это обеспечит дополнительное повышение надежности и долговечности прибора.

Таким образом, достигнутый в настоящее время уровень параметров углеродных автоэмиссионных структур обеспечивает возможность их внедрения в существующие приборы и построения на их основе новых поколений перспективных объектов приборостроения, таких как:

- высоковольтные сильноточные бездуговые вакуумные коммутационные устройства с низковольтным управлением и повышенным ресурсом на включение/отключение;
- вакуумные разрядники с управляемой электрической прочностью;
- сенсоры инфракрасного излучения на основе фотоэффекта в автоэмиссионных структурах в предпороговом режиме;
- энергоэффективные и экологически безопасные (безртутные, с высоким цветовым индексом, диффузионным свечением) источники света с развитой светоизлучающей поверхностью;
- низковольтные катодолуминесцентные дисплеи высокого разрешения;
- устройства защиты входных трактов приемников от разрушающих уровней СВЧ-сигналов;
- мощные СВЧ-приборы с микросекундным временем готовности и низковольтным управлением.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 10-07-00526-а, 12-07-12066-офи_м.

Список литературы

- [1] *Gulyaev Yu.V., Chernozatonskii L.A., Kosakovskaya Z.Ya., Sinitsyn N.I., Torgashov G.V., Zakharchenko Yu.F.* // Revue "Le Vide, Les Couches Minces". 1994. № 271. P. 322.
- [2] *Егоров Н.В., Шешин Е.П.* Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы. М.: Интеллект, 2011. 704 с.
- [3] *Wang Q.H., Setlur A.A., Lauerhaas J.M., Dai J.Y., Seelig E.W., Chang R.P.H.* // Applied Physics Letter. 1998. V. 72. Iss. 22. P. 2912.
- [4] *Pirio G., Legagneux P., Pribat D., Teo K.B.K., Chhowalla M., Amaratunga G.A.J., Milne W.I.* // Nanotechnology. 2002. V. 13. N 1. doi:10.1088/0957-4484/13/1/301.
- [5] *Dijon J., Boronat J.F., Fournier A., De Monsabert T.G., Montmayeul B., Levis M., Levy F., Sarrasin D., Meyer R., Dean K.A., Coll B.F., Johnson S.V., Hagen C., Jaskie J.E.* // Journal of the Society for Information Display. 2004. V. 12. Iss. 4. P. 373.
- [6] *Зайцев Н.А.* // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 11. С. 8.
- [7] *Chang H.-C., Li C.-C., Jen S.-F., Lu C.-C., Bu I.Y., Chiu P.-W., Lee K.-Y.* // Diamond and Related Materials. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.diamond.2012.10.011>
- [8] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 20. С. 52.
- [9] *Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И., Якунин А.Н.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 7. С. 94.
- [10] *Krusos D.A., DiSanto F.J.* Patent No. US 7,723,908 B2. Date of Patent 25.05.2010.
- [11] *Горфинкель Б.И., Абаньшин Н.П.* Патент РФ на изобретение № 2152662. Зарег. 10.07.2000 г.
- [12] *Горфинкель Б.И., Абаньшин Н.П., Якунин А.Н.* Патент РФ на изобретение № 2446506. Зарег. 27.03.2012 г.
- [13] *Abanshin N.P., Gorfinkel B.I., Yakunin A.N.* // Proc. of the 27th Int. Display Research Conference EURODISPLAY-2007, 18–20 September 2007, Moscow, P. 323.
- [14] *Pimenov S.M., Frolov V.D., Zavedeev E.V., Abanshin N.P., Du H.-Y., Chen W.-C., Chen L.-C., Wu J.-J., Chen K.-H.* // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 2011. V. 105. N 1. P. 11.
- [15] *Горфинкель Б.И., Абаньшин Н.П., Якунин А.Н.* Положительное решение ФИПС от 21.06.2012 г. по заявке на выдачу патента на изобретение № 2011121212/07(031384) с приор. от 25.05.2011 г.