

06;11

## **Исследования автоэмиссионного диода с тангенциальным токоотбором из тонкопленочного наноалмазографитового эмиттера**

© С.Ю. Суздальцев, В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров

Саратовский филиал Института радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН  
E-mail: pirpc@renet.ru

*Поступило в Редакцию 13 января 2011 г.*

Исследовано влияние параметров конструкции автоэмиссионного диода с тангенциальным токоотбором из наноалмазографитовых тонкопленочных структур, полученных в плазме СВЧ газового разряда низкого давления, на его эксплуатационные характеристики. Получены плотности тока автоэмиссии до  $20 \text{ A/cm}^2$  при рабочем напряжении  $300 \text{ V}$ . Показано, что при оптимальных параметрах конструкции диода тангенциальная схема токоотбора позволяет уменьшить более чем в два раза порог напряженности электрического поля начала автоэмиссии по сравнению с порогом напряженности при планарной автоэмиссии с этих же наноалмазографитовых структур.

Вакуумные микроэлектронные приборы и интегральные схемы, потребность в которых для практики непрерывно возрастает, сохраняя основные функции полупроводниковых приборов, обладают рядом дополнительных свойств, таких как высокая радиационная устойчивость, широкий диапазон рабочих температур, высокое быстродействие. Анализ публикаций показывает, что реальных успехов в создании конкурентоспособных коммерческих устройств и приборов, в частности систем отображения информации нового поколения, работающих на принципах автоэлектронной эмиссии, в мировой практике еще не существует. Причиной этого является отсутствие технологии создания дешевого по стоимости, надежного и долговечного автокатода.

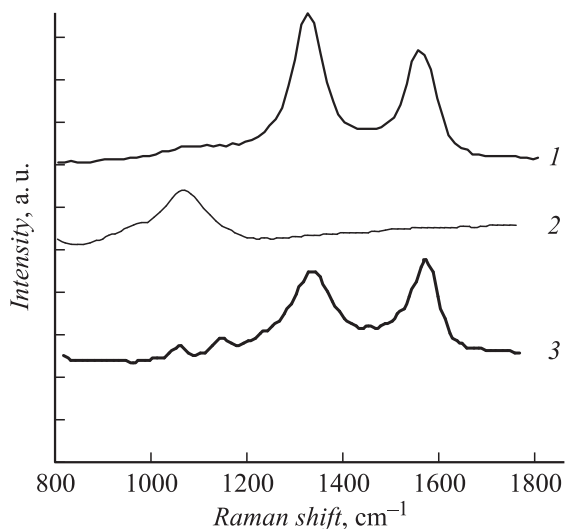
Главным содержанием проблемы надежного автокатода являются: обеспечение низкой работы выхода электронов, высоких плотностей токоотбора и мощного теплоотвода от функционирующих эмиссионных

центров. Сложность ее решения состоит в том, что, как показывает практика, ни одни из известных природных материалов не может выдержать подобных условий эксплуатации. Из-за больших тепловыделений при минимальном сечении теплоотвода от функционирующих эмиссионных центров (микровыступов) они формируются, разрушаются с образованием новых эмиссионных центров и так далее вплоть до их полного исчезновения или нарушения электронно-оптических условий для поддержания эффективной электронной эмиссии. В настоящее время наиболее перспективным материалом для автокатодов являются углеродные структуры. Их перспективность обусловлена устойчивостью к бомбардировке ионами остаточных газов, которая имеет место в приборах, работающих в условиях технического вакуума и высоковольтного питания, а также возможностью снижения работы выхода электронов при определенных структурных модификациях, характерных как для алмазного типа гибридной связи валентных электронов атомов углерода, так и для „открытых“ углеродных нанотрубок с графитовым типом структуры [1].

Целью настоящей работы являлась разработка оптимальной конструкции, технологии изготовления автоэмиссионного диода на основе углеродного тонкопленочного эмиттера с тангенциальным токоотбором и исследование его эксплуатационных характеристик.

Осаждение углеродных структур автокатодов осуществлялось в плазме СВЧ газового разряда паров этанола по методике, описанной в [1]. Верхний и нижний изолирующие слои изготавливались осаждением в СВЧ-плазме газовой смеси моносилана и этанола аморфного гидрированного крабида кремния состава  $Si_{0,8}C_{0,2}$ . Для получения „свеса“ торца углеродной пленки, предназначенного для усиления электрического поля в зазоре между катодом и анодом, после проведения фотолитографии для создания контролируемого по величине зазора между катодом и анодом, трехслойная структура подвергалась СВЧ плазмохимическому травлению с управляемой анизотропностью. Управление анизотропностью осуществлялось изменением рабочего давления в плазме СВЧ газового разряда  $CF_4$  [2].

На рис. 1 приведены типичные спектры комбинационного рассеивания света (КРС) для углеродных пленок различного фазового состава, полученных в различных режимах генерации СВЧ-плазмы и использованных в качестве эмиттеров. Для получения спектров КРС использовалось излучение лазера с длиной волны 473 nm при времени



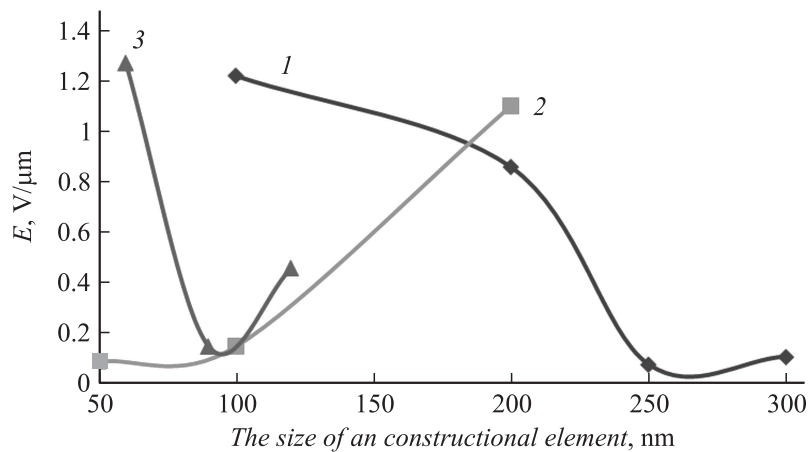
**Рис. 1.** Спектры КРС для наноалмазграфитовых 1, алмазных 2 и графитоподобных 3 пленок, полученных в различных областях режимов СВЧ ВПО в парах этанола.

позиционирования 35 s. Определены области режимов, обеспечивающих раздельное осаждение как углеродных пленочных структур заданной аллотропной модификации (нанокристаллический алмаз, графит), так и структур, содержащих алмазную и графитовую фазы в различных объемных соотношениях. Для пленок, полученных в области режимов со смешанным фазовым составом (кривая 1), характерным является наличие ярко выраженного двухпикового спектра: достаточно сильной и узкой линии в области  $1330\text{ cm}^{-1}$ , которая свидетельствует о присутствии алмазной фазы, и второго пика в области  $1580\text{ cm}^{-1}$ , который обусловлен присутствием углерода в форме графита, как кристаллического, так и аморфизированного. Появление в спектре КРС углерода размытого сигнала в районе частоты  $1150\text{ cm}^{-1}$  обычно связывают с уменьшением дальнего порядка в алмазных кристаллитах до величины в несколько нанометров и/или наличием  $sp^2$ -гибридизации на их поверхности (кривая 2). В области режимов, соответствующих получению преимущественно графитовых пленок (кривая 3), доми-

нирующим является сигнал в области  $1580\text{ см}^{-1}$ . Присутствующий же в спектре меньший по величине сигнал в области  $1330\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о том, что полученный в СВЧ-плазме графитоподобный материал содержит в структуре небольшое количество алмазной фазы.

Исследованиями профилей низкоэнергетичного СВЧ плазмохимического травления карбида кремния (величин подтравов и глубин травления), полученных при различных давлениях рабочего газа  $\text{CF}_4$ , установлено, что анизотропность травления изменялась от 1.6 при  $P = 10\text{ Pa}$  до 40 при  $P = 0.1\text{ Pa}$ . Очевидно, что такая зависимость анизотропности травления от давления рабочего газа обусловлена изменением длины свободного пробега активных частиц плазмы. По аналогии с законами геометрической оптики, следует ожидать, что чем больше длина свободного пробега и выше направленность поступления частиц в зону травления, тем меньше вероятность их попадания под маскирующий выступ. Напротив, при малых длинах свободного пробега в результате столкновений частиц, близких по массе и величине импульса, возможно и переотражение под маскирующий слой. Причем вероятность такого переотражения под край маски может увеличиваться с увеличением глубины травления, что, в свою очередь, может привести к получению не контролируемой величины подтравы и коэффициента усиления электрического поля в диодной структуре. В связи с этим в качестве варьируемых факторов конструкции диода рассматривались ширина зазора катод/анод, толщины всех структурных слоев диода, а также режимы их травления для создания оптимальной величины „свеса“ углеродного эмиттера в обеспечение наилучшего усиления электрического поля в зазоре катод–анод. Выходными контролируемыми параметрами являлись пороговое напряжение начала процесса автоэмиссии и плотность тока автоэмиссии. За пороговое напряжение принималось напряжение, при котором измеряемый ток между катодом и анодом становился больше  $0.03\text{ }\mu\text{A}$ . Измерения ВАХ проведены в вакууме  $10^{-6}\text{ Pa}$  при изменении электрического напряжения в интервале от 3 до 500 V. Величина зазора между катодом и анодом изменялась в диапазоне от 3 до  $80\text{ }\mu\text{m}$ .

Предварительными автоэмиссионными измерениями было установлено, что при любых произвольных параметрах конструкции диода ( $I$  — величины „свеса“,  $d_1$  — толщины верхнего диэлектрического слоя карбида кремния,  $d_2$  — толщины наноалмазографитового эмиттера,



**Рис. 2.** Зависимости напряженностей электрического поля порога автоэмиссии от размера элемента конструкции диода с зазором между катодом и анодом  $30 \mu\text{m}$ . 1 — толщины нижнего слоя карбида кремния ( $d_3$ ); 2 — толщины слоя углерода ( $d_2$ ); 3 — величина подтрава  $l$ .

$d_3$  — толщины нижнего диэлектрического слоя карбида кремния) напряженность поля порога автоэмиссии практически линейно возрастает с увеличением ширины зазора ( $L$ ) между катодом и анодом. В частности, в исследованном интервале изменения величины  $L$  от  $30$  до  $80 \mu\text{m}$  при фиксированных других параметрах диода изменения напряженностей поля порога автоэмиссии составили от  $0.3$  до  $0.8 \text{ V}/\mu\text{m}$ . В связи с этим дальнейшая оптимизация параметров конструкции была проведена при постоянной величине зазора катод–анод, равной  $30 \mu\text{m}$ . При этом напряжение порога эмиссии диода составляло  $10$ – $15 \text{ V}$ , что удовлетворяет требованиям низковольтности управления данным устройством.

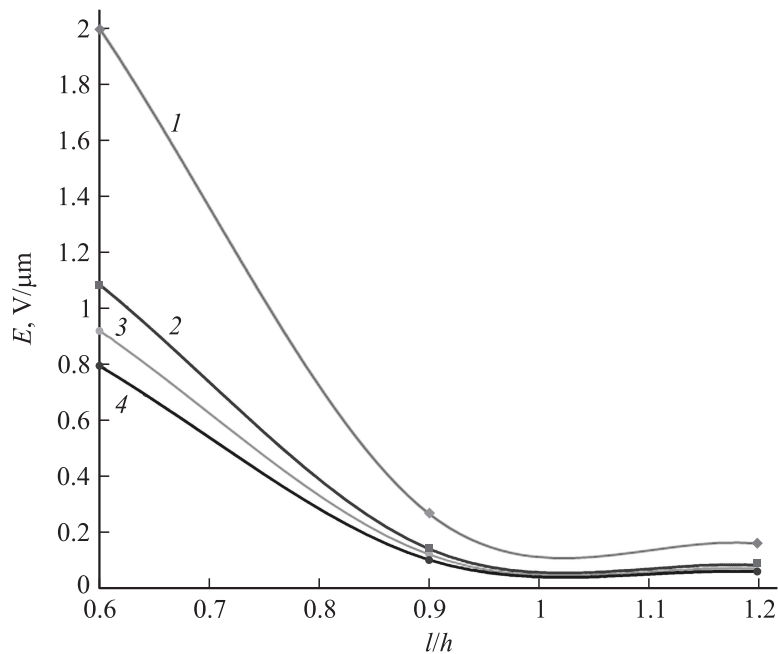
На рис. 2 приведены зависимости пороговых напряженностей поля автоэмиссии от толщин нижнего слоя карбида кремния ( $d_3$ ) и углеродного эмиттера ( $d_2$ ), а также от величины подтрава („свеса“) для фиксированных  $d_2 = 100 \text{ nm}$  и  $d_3 = 300 \text{ nm}$ , при которых значения пороговых напряженностей имели минимальные значения. (Формирование величины „свеса“ для каждого заданного значения толщин  $d_2$  и  $d_3$  осуществлялось регулировкой длительности процесса СВЧ ПХТ с

анизотропностью травления, равной двум. Подтрав производился после высокоанизотропного травления карбида кремния на его заданную толщину (при давлении  $\text{CF}_4$  в СВЧ-плазме 0.1 Па). Как следует из приведенных зависимостей, при величине зазора  $30 \mu\text{m}$  для обеспечения минимального порога автоэмиссии толщина торцевого слоя эмиттера не должна превышать  $100 \text{nm}$ , а толщина нижнего слоя диэлектрика не должна быть меньше  $0.25\text{--}0.3 \mu\text{m}$ . Зависимость напряженности поля порога автоэмиссии от величины „свеса“ торца эмитирующей пленки имеет экстремум (кривая 3 на рис. 2). При толщине пленки эмиттера от  $50$  до  $100 \text{nm}$  экстремум наблюдается при величине свеса  $90\text{--}100 \text{nm}$ , что соответствует значениям аспектного отношения ( $l/d_2$ ) в интервале от  $0.9$  до  $2$ .

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости пороговых напряженностей поля автоэмиссии от аспектного отношения для различных величин зазоров между катодом и анодом и фиксированной толщины нижнего карбида кремния  $d_3 = 0.25 \mu\text{m}$ . Можно видеть, что при аспектных отношениях, меньших единицы, напряженность поля порога автоэмиссии возрастает тем сильнее, чем меньше величина зазора, т.е. в тангенциальных источниках электронов критичность напряженности поля порога автоэмиссии к изменению (флуктуации) аспектного отношения (соотношению величин „свеса“ и толщины эмиттерного слоя) возрастает при уменьшении величины зазора между катодом и анодом.

Исследованиями зависимостей тока эмиссии от напряженности электрического поля в диодной структуре с торцевым токоотбором с эмиттером на основе графитоподобных, которым соответствовал спектр КРС вида 3 на рис. 1, и наноалмазграфитовых пленок, которым соответствовал спектр КРС вида 1 на рис. 1, установлено, что графитоподобные пленки имеют существенно больший порог напряженности электрического поля, обеспечивающий появление автоэмиссионного тока. Автоэмиссия из торцов пленок, имеющих спектр КРС вида 2 на рис. 1, в исследованном диапазоне электрических напряжений не наблюдалась.

Исследования планарной и тангенциальной автоэмиссии из полученных наноалмазграфитовых пленочных структур показали, что при расстоянии между катодом (пленкой) и анодом, представляющим собой цилиндр диаметром  $3 \text{mm}$ , изготовленный из углеродного материала МПГ-6, равном величине зазора в диоде с тангенциальным токоотбором,



**Рис. 3.** Зависимости напряженностей электрического поля порога автоэмиссии тангенциального источника электронов на основе наноалмазграфитовой структуры от аспектного отношения для  $d_3 = 0.25 \mu\text{m}$  и различных величин зазора катод–анод ( $L$ ): 1 —  $30 \mu\text{m}$ , 2 —  $55 \mu\text{m}$ , 3 —  $65 \mu\text{m}$ , 4 —  $75 \mu\text{m}$ .

порог напряженности электрического поля начала автоэмиссии при тангенциальном токоотборе, по сравнению с планарной автоэмиссией, уменьшается более чем в 2 раза: с 8–10 до 3–5  $\text{V}/\mu\text{m}$ . Напряженность поля начала планарной автоэмиссии из гарфиоподобных пленок, имеющих спектр КРС вида 3 на рис. 1, составила 25–40  $\text{V}/\mu\text{m}$ .

Плотность тока при планарной автоэмиссии из катодных матриц, изготовленных на основе наноалмазграфитовых структур, достигала  $2 \text{ A}/\text{cm}^2$ . При тангенциальном токоотборе с оптимальными параметрами конструкции диода с наноалмазграфитового эмиттера плотность автоэмиссионного тока составила  $20 \text{ A}/\text{cm}^2$  при напряжении между катодом и анодом 300 В.

Таким образом, торцевая автоэмиссия за счет дополнительного усиления электрического поля в зазоре катод—анод позволяет получать заданный эмиссионный ток при значительно меньших рабочих напряжениях. В тангенциальных источниках электронов критичность напряженности поля порога автоэмиссии к изменению (флуктуации) аспектного отношения возрастает при уменьшении расстояния между катодом и анодом, что необходимо учитывать для обеспечения воспроизводимости их характеристик в групповом и массовом производстве.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Гос. контракт № 02.740.11.0795).

## Список литературы

- [1] Яфаров Р.К. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 1. С. 42–48.
- [2] Шаныгин В.Я., Яфаров Р.К. // Вестник СГТУ. 2010. № 3 (47). В. 2. С. 81–86.