

06;11

Латеральный эмиттер как базовый элемент интегральной эмиссионной электроники

© С.А. Гаврилов, Э.А. Ильичев, А.И. Козлитин, Э.А. Полторацкий,
Г.С. Рычков, Н.Н. Дзбановский, В.В. Дворкин, Н.В. Суетин

Федеральное государственное унитарное предприятие
„Научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф.В. Лукина“, Москва
Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета
E-mail: polt@niifp.ru

Поступило в Редакцию 22 декабря 2003 г.

Основным элементом эмиссионной электроники, определяющим возможности приборов, является полевой эмиттер. Предлагается латеральный эмиттер на основе углеродных нанотрубок для эмиссионной интегральной микроэлектроники. Исследованы зависимости эмиссионного тока от тянущего и управляющих полей и показано, что латеральный эмиттер может быть использован во всех микроэлектронных аналогах вакуумных приборов от сверхвысокочастотных до плоских экранов, при этом технология изготовления приборов является интегральной.

Различные конструкции вертикальных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок и их эмиссионные свойства широко представлены в научной литературе [1,2]. Большой интерес к этой конструкции вызван стремлением создать плоский экран, который бы заменил громоздкие мониторы на основе электронно-лучевых трубок и был бы более дешевым в производстве, чем жидкокристаллические мониторы, превосходя последние по яркостным характеристикам. Превосходные эмиссионные характеристики углеродных нанотрубок потенциально позволяют не только создать плоские экраны, но и перейти к разработке совершенно нового класса интегральных эмиссионных приборов широкого применения. Для создания таких приборов необходим латеральный полевой эмиттер, технология изготовления которого была бы интегральной. В работе [3] для создания латерального эмиттера предложен способ, где

в слое фоторезиста из массива случайно ориентированных нанотрубок выбирают участки, содержащие элементы параллельно расположенных нанотрубок. Случайное расположение таких участков делает практически невозможным применение фотолитографических методов для производства интегральных схем по заданному топологическому рисунку. Таким образом, данный метод применим лишь для создания отдельного латерального эмиттера. Следует особо отметить, что использование готовых углеродных нанотрубок для изготовления латеральных приборов всегда связано со сложным процессом формирования, хотя бы с одной стороны, нанотрубки надежного омического контакта с проводником, который стремятся делать в виде широкой (по отношению к нанотрубке) площадки. Естественно, что все такие приборы являются только макетами возможных интегральных приборов.

Нами была предложена технология изготовления латеральных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок для формирования интегральных схем с высокой плотностью размещения компонентов [4,5]. Ключевым моментом в создании интегрального эмиттера является формирование многослойной структуры, содержащей слой каталитического материала (железа, никеля, кобальта и т.д.), обеспечивающего рост углеродных нанотрубок. Сверху каталитического слоя находится некаталитический слой, который может быть как проводником, так и диэлектриком. Из многослойной структуры с помощью литографии формируется прямоугольный параллелепипед, боковые грани которого, кроме грани, обращенной в сторону анода, закрыты некаталитическим материалом. В незакрытой боковой грани находится торец каталитического слоя в форме узкой полосы, ширина которой равна толщине каталитического слоя и составляет 1–20 нм. Одним из известных способов [6] на торце каталитического слоя выращивают короткие углеродные нанотрубки, образующие „лезвие“ толщиной, определяемой толщиной каталитического слоя. У полученных таким образом эмиттеров были исследованы эмиссионные свойства в рамках диодных вольт-амперных характеристик [3]. Показано, что пороговые напряженности поля составляют 1.5–2 V/μm и при напряженности поля 5 V/μm плотность тока достигает 5 μA/mm (ток приведен к единице длины, так как электроны эмиттируются из линейно упорядоченных нанотрубок). Для использования латерального эмиттера в разнообразных приборах необходимо показать, что можно эффективно управлять эмитируемым электронным потоком.

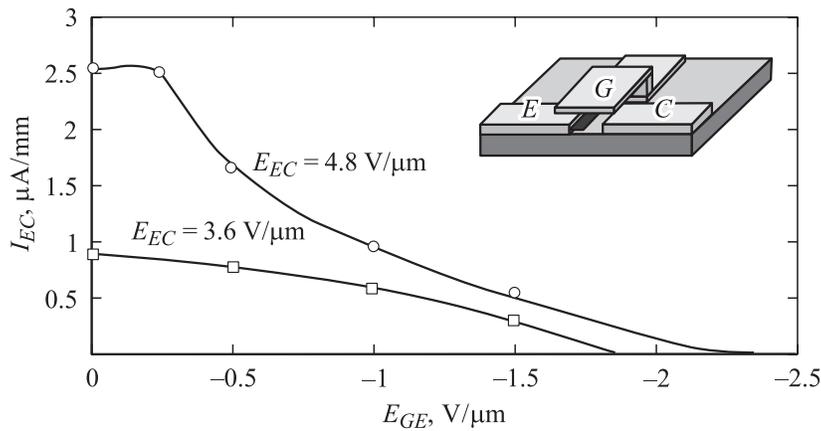


Рис. 1. Зависимость тока эмиттер–коллектор I_{EC} от напряженности управляющего поля E_{GE} .

В настоящей работе представлены результаты исследования зависимости эмиттируемого тока от напряженности поля E_G , создаваемого управляющим электродом (см. вставку на рис. 1). Электрод G расположен над плоскостью, на которой находятся эмиттер E и коллектор C , и частично перекрывает как эмиттер, так и коллектор. При заземленном эмиттере на коллектор подавалось положительное напряжение V_C , которое создавало между коллектором и эмиттером напряженность поля E_{CE} . С помощью управляющего электрода между ним и эмиттером создавалось поле E_{GE} , величина которого менялась от 0 до $-5 \text{ V}/\mu\text{m}$. Зависимость удельного эмиссионного тока I_{EC} от напряженности поля E_{GE} представлена на рис. 1 для $E_{CG} = 4.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ и $E_{CE} = 3.8 \text{ V}/\mu\text{m}$. Из рис. 1 видно, что для полного перекрытия тока требуется E_{GE} почти в два раза меньше, чем E_{CE} . Измерения тока затвора показали, что он менее $10^{-9} \text{ A}/\text{mm}$ при $0 \leq E_{GE} \leq 5 \text{ V}/\mu\text{m}$. Полученные результаты показывают, что на основе рассматриваемого эмиттера можно создать полный аналог электронной лампы в микро- и наноисполнении, а тем самым и элементную базу для эмиссионной электроники.

Таким образом, разработанные принципы построения всего спектра электронных устройств на лампах автоматически можно перенести

на интегральные схемы эмиссионной электроники. Однако следует иметь в виду, что эмиссионные элементы на углеродных нанотрубках имеют высокое быстродействие, которое в первую очередь объясняется высокой плотностью тока. Так, одна нанотрубка диаметром 20–40 нм может эмиттировать ток более $1 \mu\text{A}$ [4]. Простые оценки показывают, что время переключения у таких элементов может составлять менее 10^{-12} с, что в пересчете на частотную полосу пропускания таких „наноламп“ составляет несколько терагерц. Следует особенно отметить, что „наноламп“ могут стать тем средством, которое поможет освоить частотный диапазон, заключенный между сверхвысокими радиочастотами и нижними частотами оптического излучения. Но в этом случае необходимо освоить технологию изготовления резонаторов, волноводов, ответвителей и т.д., имеющих размеры в десятки микрон. Такая технология в последнее время интенсивно развивается и составляет основу микромеханики. Из сказанного следует, что использование латерального эмиттера может позволить эмиссионной электронике сделать технологический прорыв в области терагерцевой связи. Более того, поскольку резонансные частоты молекул многих газов и веществ лежат в области терагерцевых частот, то наличие интегральных генераторов и детекторов в этой области обеспечит разработку малогабаритных датчиков, обнаруживающих наличие газа или определенного вещества путем спектрального анализа.

Разные конструкции вертикальных эмиттеров на основе углеродных нанотрубок изучаются многочисленными исследовательскими группами в первую очередь с целью разработки плоских экранов. Латеральные эмиттеры также дают возможность сконструировать плоский экран. На рис. 2 представлена зависимость токов двух коллекторов, имеющих общий латеральный эмиттер, на который подано напряжение — 480 В. Первый коллектор расположен в той же плоскости, что и эмиттер, на расстоянии $100 \mu\text{m}$ и находится под нулевым потенциалом. Второй коллектор удален от плоскости эмиттера на расстояние $200 \mu\text{m}$ и находится как над эмиттером, так и над первым коллектором. Зависимость токов дана от напряжения V_{2c} на втором коллекторе. Видно, что при напряжении $V_{2c} = 0$ ток второго коллектора равен 0, а при $V_{2c} = 50$ В он составляет $\sim 50\%$ от тока эмиттера. Важным фактором является то, что при этом электроны, попадающие на второй коллектор, имеют энергию ~ 500 эВ. Таким образом, если вместо второго коллектора поместить прозрачный электрод с нанесенным на него люминофором,

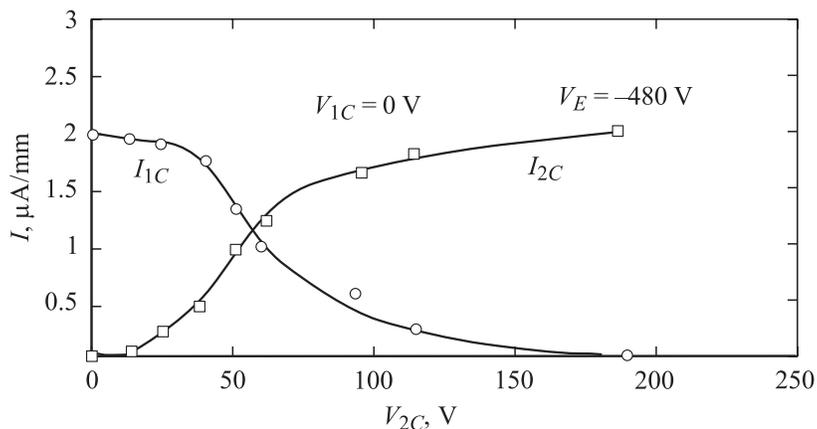


Рис. 2. Зависимости токов первого и второго коллекторов от напряжения на втором коллекторе.

то подачи на этот электрод напряжения от 10–100 V можно заставить люминофор светиться под действием электронов с энергией 100–1000 eV. Следовательно, можно предложить простую конструкцию плоского цветного экрана. Ее основу должны составлять две пластины. На одной из них формируются две системы шин, одна из которых представляет латеральные эмиттеры, а другая — первые коллекторы. Вторая пластина прозрачная, и на ее поверхности формируются чередующиеся параллельные три системы шин. Каждая из трех систем представляет собой прозрачные электроды, на которые наносится соответствующий цветной люминофор. Пластины располагаются параллельно так, чтобы их шины были перпендикулярны и обращены в сторону друг друга.

В заключение отметим, что латеральный эмиттер может, как было показано, выполнять функции и вертикального эмиттера. Последнее придает особую гибкость в конструировании интегральных схем, так как позволяет решить проблему пересечений посредством эмиссии электронов с одной плоскости на другую.

Работа проведена при финансовой частичной поддержке гранта NATO SfP-974354 и гранта МНТП „Физика твердотельных наноструктур“.

Список литературы

- [1] *Hsu D.S.Y.* // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 80. P2988–2990.
- [2] *Li D., Zhang J.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 2001. V. 19 (5). P. 1820–1823.
- [3] *Teh A.S., Lee S.-B., Teo K.B.K.* // *Microelectronic Engineering.* 2003. N 67–68. P. 789–796.
- [4] *Gavrilov S.A., Dzbanovsky N.N., Dvorkin V.V.* et al. // *Proceedings of 11th International Symposium „Nanostructures: Physics and Technology“.* St. Petersburg, Russia. June 23–28, 2003. P. 234–236.
- [5] *Gavrilov S.A., Dzbanovsky N.N., Dvorkin V.V.* et al. // *Abstr. Int. Conf. „Micro- and nanoelectronics-2003“*, October 6–10. Moscow–Zvenigorod, Russia, 2003. P. 01–27.
- [6] *Huczko A.* // *Appl. Phys.* 2002. A74. P. 617–638.