

11;12

Измерители вакуума, использующие эмиттеры из углеродных нанотрубок

© S.J. Kim

Division of Electronic and Electrical Engineering Kyungnam University,
Masan, Korea 631-701
E-mail: sjki1216@kyungnam.ac.kr

В окончательной редакции 15 марта 2005 г.

Предлагаются измерители вакуума на основе углеродных нанотрубок (УНТ) и рассматривается зависимость полевой эмиссии из УНТ от уровня вакуума. Предлагаемый датчик давления, основанный на теории электрического разряда, известной как закон Пашена, и определяет уровень вакуума путем измерения зависимости тока от концентрации газа (или воздуха), который может ионизоваться при столкновении с электронами, возникающими при полевой эмиссии.

Недавно было показано, что углеродные нанотрубки (УНТ) могут иметь широкую область применений, в том числе для полевых электронных эмиттеров [1,2], транзисторов, работающих при комнатной температуре [3], накопителей водорода [4] и химических датчиков [5]. Полевая эмиссия из УНТ исследовалась особенно интенсивно, что связано с превосходными эмиссионными свойствами УНТ. Однако большинство исследований в настоящее время сконцентрировано на изучении возможностей создания плоских дисплеев, дисплеев, основанных на использовании полевой эмиссии (ДПЭ), имеющих огромный коммерческий рынок.

В этой статье как одно из новых применений УНТ мы рассматриваем вакуумный датчик, с использованием УНТ в качестве электронного эмиттера. Обычно измерение уровня вакуума производится путем измерения изменений физических свойств (например, теплопроводности, электрического разряда или вероятности ионизации), которые зависят от концентрации остаточного газа. В настоящее время широко представлены различные приборы для измерения вакуума, такие как трубки Geissler, измерители давления Pirani, Penning и ионизационные датчики. В этой статье демонстрируются возможности датчика

вакуума, в котором УНТ используются как автоэлектронные эмиттеры.

Структура предлагаемого датчика состоит из трех слоев: эмиттера, прокладки и анода. Сильно легированные пластины кремния *p*-типа проводимости (*p*-Si (100), диаметр пластины 4 дюйма) были использованы в качестве подложек для электронных эмиттеров. Пленки титана осаждались на подложки распылением и затем с помощью электронного пучка на титановый слой наносилась 10-нм пленка железа, служащего катализатором для роста УНТ. Пленка катализатора была обработана с использованием соответствующей техники фотомаскирования и lift-off, чтобы приготовить соответствующий рисунок и однородно распределить УНТ эмиттеры на площади $2 \times 2 \text{ mm}^2$, а затем до роста УНТ с использованием термического CVD пластины разделялись на квадраты размером $12 \times 12 \text{ mm}$ [6,7]. В течение CVD процесса C_2H_2 пропускался через камеру со скоростью 30 cm/s, рост УНТ проходил при 850°C в течение 10 min. На рис. 1, *a* показана структура эмиттера на основе УНТ. Следующий, промежуточный слой (прокладка) для изоляции представлял собой стекло пирекс толщиной $500 \mu\text{m}$, в котором методом „sand blast“ была осуществлена гравировка, чтобы открыть доступ воздуха к поверхности с защитной маской (рис. 1, *b*). Наконец, эти эмиттеры и анодные электроды, изготовленные из сильнолегированного кремния, были собраны со стеклянными прокладками (как это показано на рис. 1, *c*) и спаяны при 400°C .

Измерения полевой эмиссии проводились с использованием высоковольтного источника (максимальное напряжение 100 V, что соответствовало величине электрического поля $2 \cdot 10^6 \text{ V/m}$), соединенном последовательно с ограничивающим сопротивлением в диапазоне давлений от 10^{-1} до 10^{-3} Torr , верхний предел которого был ограничен возникновением тлеющего разряда при давлении выше 10^{-1} Torr . Измерения тока проводились на Keithley 2425 SourceMeter.

Электроны, испускаемые УНТ эмиттером, при высоком электрическом поле движутся к аноду, сталкиваясь с молекулами нейтрального газа, что ведет к некоторой ионизации, и, следовательно, образуют дополнительные вторичные электроны и положительные ионы. Поэтому появление вторичных электронов вследствие столкновений приводит к возрастанию тока с увеличением концентрации газа. Некоторые свойства полевой эмиссии были измерены в зависимости от уровня вакуума. На рис. 2 показаны зависимости ток–напряжение при разных

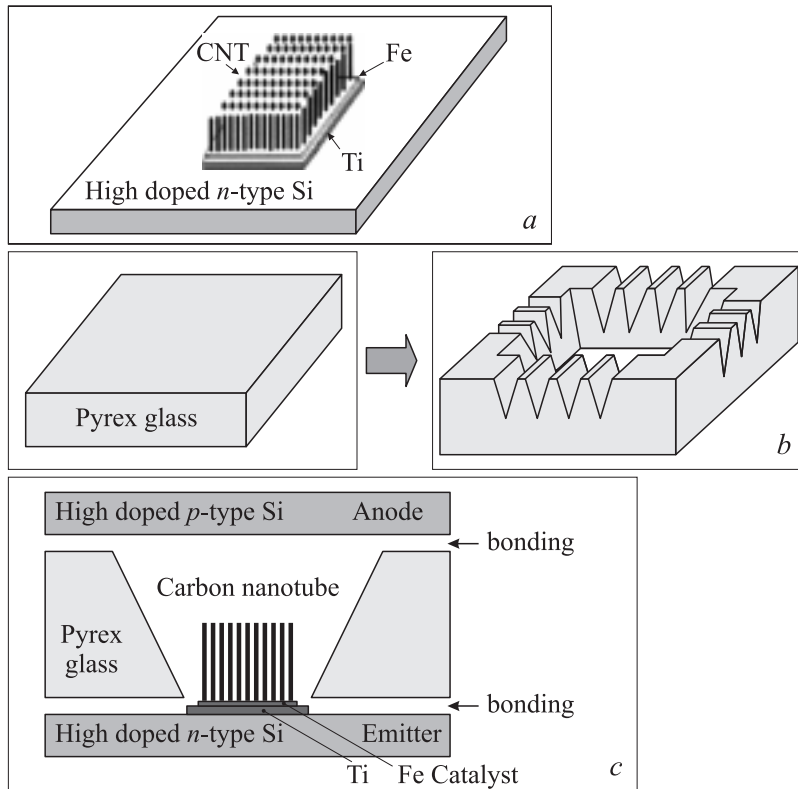


Рис. 1. Процесс изготовления прибора: *a* — УНТ электронный эмиттер, *b* — структура, изготовленная на стекле методом „send blast“, *c* — монтаж прибора Si/стекло.

уровнях вакуума. В то время как величина тока не превышает $1 \mu\text{A}$ при напряжении до 1 kV в относительно высоком вакууме (или относительно низкой концентрации газа) $2 \cdot 10^{-3} \text{ Torr}$, резкое возрастание тока наблюдается выше 500 V при давлении $7 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ и ниже 400 V при давлении $4 \cdot 10^{-1}$ соответственно. Резкое возрастание при относительно высокой концентрации газа является, как предполагаем, результатом

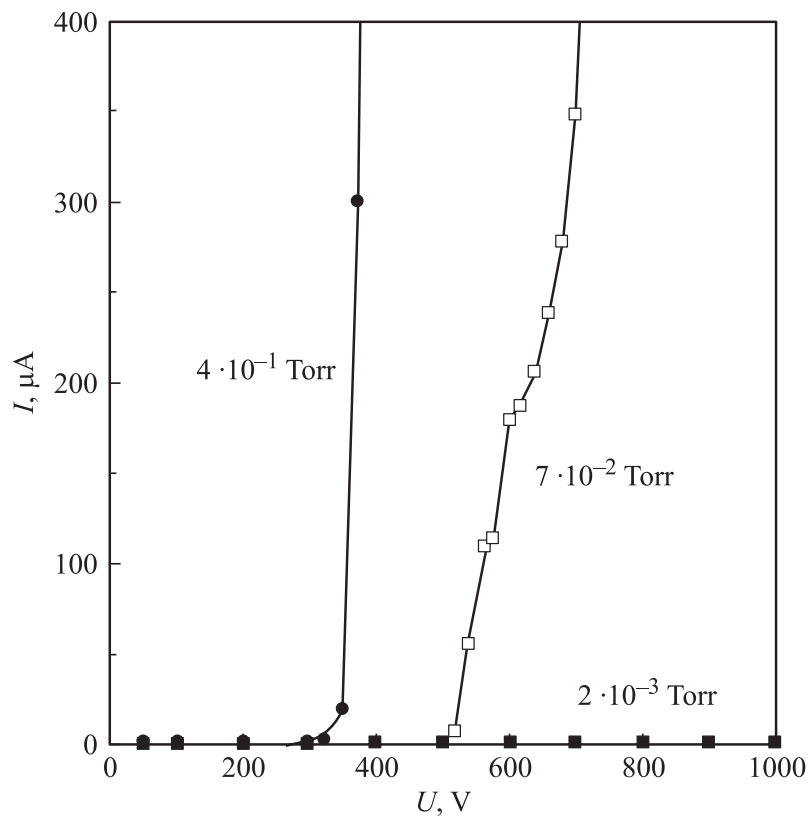


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика при различных уровнях вакуума.

действия вторичных электронов, возникающих при столкновениях. На рис. 3 показано резкое возрастание тока сразу после некоторого критического давления, при постоянных напряжениях 500 или 1000 В. Таким образом, имеется некоторая минимальная концентрация газа, требуемая для образования каскада вторичных электронов. Критическое давление было около $3 \cdot 10^{-2}$ Torr при 500 В и около $1 \cdot 10^{-2}$ Torr при 1000 В. Следовательно, концентрация снижается при увеличении приложенного напряжения.

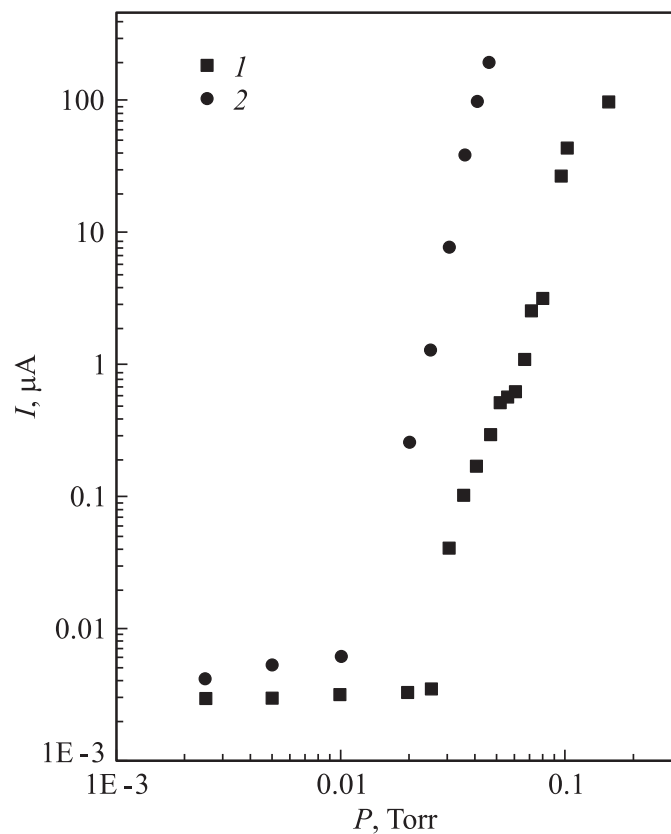


Рис. 3. Зависимость тока от уровня вакуума при различных напряжениях: 1 — 500 V; 2 — 1000 V.

Результаты можно суммировать следующим образом. Изготовлены вакуумные датчики, использующие полевые эмиттеры на основе углеродных нанотрубок, структуры кремний–стекло–анод и формирование рисунка по типовой кремниевой технологии; при этом измерены параметры полевой эмиссии как функция уровня вакуума. Показано, что датчики могут найти применение для вакуумных приборов в диапазоне от 10^{-1} до 10^{-3} Torr.

Хотелось бы выразить благодарность лаборатории профессора Nakayama в Отделении физики и электроники Университета префектуры Осака в Японии за технологию осаждения слоев титана и железа.

Список литературы

- [1] *Lee N.S., Chung D.S., Han I.T.* et al. // *Diamond and Related Materials*. 2001. V. 10. P. 265.
- [2] *Gavrilov S.A., Ilchev E.A., Poltoratskii E.A.* et al. // *Tech. Phys. Lett.* 2004. V. 30. P. 75.
- [3] *Avouris P., Appenzeller J., Martel R.* et al. // *Proc. of IEEE*. 2003. V. 91. P. 1772.
- [4] *Zhang H., Chen Y., Li S.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. P. 6417.
- [5] *Penza M., Cassano G., Aversa P.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2004. V. 85. P. 2379.
- [6] *Fan S., Chapline M.G., Franklin N.R.* et al. // *Science*. 1999. V. 283. P. 512.
- [7] *Lee C.J., Kim D.W., Lee T.J.* et al. // *Chem. Phys. Lett.* 1999. V. 312. P. 461.