

11;12

Вакуумный эмиссионный триод на основе умножителя-концентратора электронов

© Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Э.А. Полторацкий, Г.С. Рычков

Научно-исследовательский институт физических проблем
им. Ф.В. Лукина, Москва
E-mail: polt@niifp.ru

Поступило в Редакцию 27 мая 2010 г.

Описываются конструкция и технология изготовления вакуумного эмиссионного триода (ВЭТ), выполненного на основе умножителя-концентратора электронов (УКЭ), играющего роль автоэмиссионного катода и обеспечивающего существенное повышение плотности тока по сравнению с существующими эмиттерами. Приводятся экспериментальные вольт-амперные характеристики ВЭТ. Обсуждается возможность создания интегральных схем на основе предложенного ВЭТ.

Цифровое телевидение, спутниковая связь, узкополосная и сверхширокополосная радиолокация ставят задачу освоения частотного диапазона в несколько сотен гигагерц. Для решения этой задачи необходимо создать активные элементы соответствующего быстродействия, а это возможно, если рабочие токи этих элементов будут иметь плотность, превосходящую 10 A/cm^2 .

Другой важной задачей является разработка аппаратуры, способной функционировать в условиях повышенных температур ($-100 \div +300^\circ \text{C}$) и спецвоздействий.

Решение обеих этих задач связывают с развитием автоэмиссионной электроники, в которую в настоящее время вкладывают большие средства, поддерживая и развивая ряд крупных проектов [1]. Основной причиной, сдерживающей внедрение автоэмиссионной электроники в промышленность, является отсутствие надежных и мощных автоэммиттеров электронов. Сначала решение проблемы связывали с появлением углеродных нанотрубок (УНТ) [2–5]. Однако выяснилось, что эмиттеры на основе УНТ, получаемые методом газофазного осаждения (CVD), имеют малую плотность тока и недостаточную стабильность [6].

Все, что имеется на рынке, — это эмиттеры, полученные на основе композиционных материалов, включающие УНТ диаметром до 20 нм и наночастицы размером 10–50 нм. Максимальная плотность тока этих эмиттеров не превышает 0.1 A/cm^2 и при непрерывной работе более 100 часов плотность тока существенно уменьшается.

В работе [7] предлагается построение автоэмиссионной электроники на основе умножителя-концентратора электронов (УКЭ). Показано, что плотность первичного потока электронов за счет их умножения и концентрации можно увеличить в десятки и даже сотни раз. УКЭ представляет сквозное сужающееся отверстие в проводящей пластине. Стенки отверстия покрыты пленкой проводящего поликристаллического алмаза. Первичный поток электронов, проникающий в отверстие со стороны ее широкой части, падает на стенки отверстия и рождает вторичные электроны в алмазной пленке. Часть вторичных электронов в силу небольшого (и даже отрицательного) сродства к электрону у алмаза покидают пленку и образуют в отверстии электронный газ, который под действием электрического поля и диффузии выходит через узкую часть отверстия.

Конструкция вакуумного эмиссионного триода (ВЭТ) изображена на рис. 1, *a*. Ее основу составляет УКЭ (1), играющий роль эмиттера электронов. Над выходным отверстием УКЭ расположена сетка (2), которая сформирована на кремниевой рамке (3). УКЭ и сетку разделяет слюдяная прокладка (4) толщиной $\approx 30 \mu\text{m}$, такая же прокладка (5) помещена между рамкой (3) и анодом (6). Входное и выходное отверстия УКЭ имеют размеры $1 \times 1 \text{ mm}$ и $0.5 \times 0.5 \text{ mm}$ соответственно, а высота $\approx 0.5 \text{ mm}$. Анод 6 удален от сетки 2 на расстояние $\approx 0.5 \text{ mm}$. Снимки, полученные с помощью РЭМ сетки 2, представлены на рис. 1, *b*. Проводники, образующие сетку, сформированы из золотой пленки и имеют толщину $0.3 \mu\text{m}$ и ширину $7 \mu\text{m}$. Размер ячейки сетки составляет $60 \times 60 \mu\text{m}$.

Для испытания ВЭТ был использован катодно-сеточный узел (КСУ), корпус которого представляет полый металлический цилиндр с расположенной посередине сеткой, имеющей омический контакт с корпусом. В корпусе на расстоянии $100 \mu\text{m}$ от сетки на торце сплошного цилиндра расположен полевой автокатод. При заземленном корпусе и приложении напряжения -800 V к автокатоду он в вакууме эмитирует электроны через сетку к входному отверстию КСУ. С помощью соответствующей оснастки ВЭТ закрепляется на выходе КСУ таким образом,

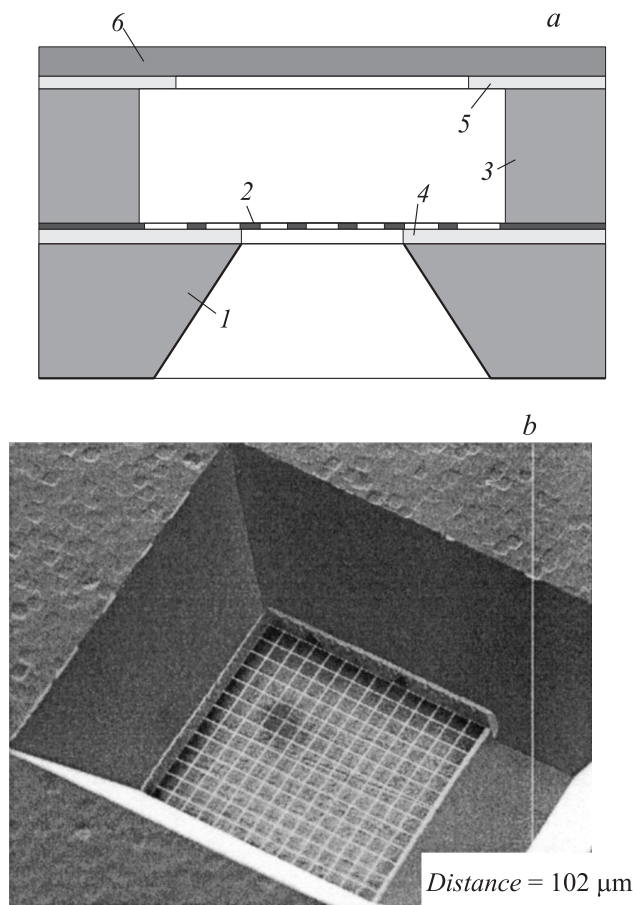


Рис. 1. Вакуумный эмиссионный триод. *a* — конструкция триода: 1 — усилитель-концентратор электронов, 2 — управляющий электрод, выполненный в виде сетки, 3 — кремниевая рамка, 4 и 5 — слюдяные прокладки, 6 — анод; *b* — РЭМ изображения сетки.

что вход УКЭ обращен в сторону потока первичных электронов. КСУ с ВЭТ помещаются в вакуумную камеру и при давлении 10^{-7} – 10^{-8} Торр измеряются ВАХ триода.

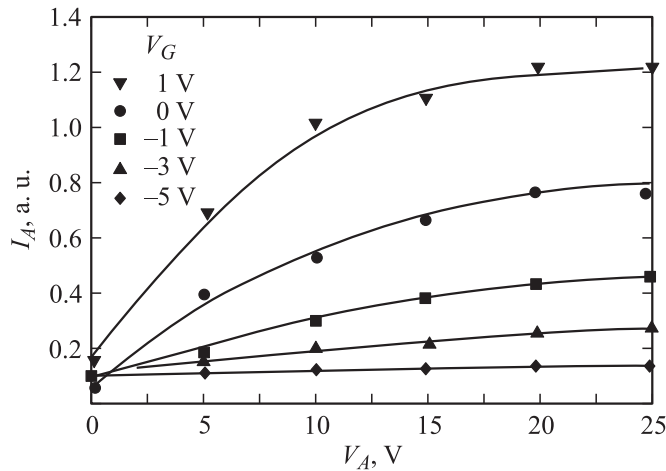


Рис. 2. Зависимости тока анода триода от напряжения на аноде при разных напряжениях на сетке.

На рис. 2 изображено семейство ВАХ тока анода I_A от напряжения на аноде V_A при разных V_G . ВАХ имеют характер пентодных характеристик. Значения токов ВАХ даны в относительных единицах. Абсолютные значения определяются как KI_{pr} , где K — коэффициент усиления потока электронов УКЭ, а I_{pr} — ток первичных электронов. Измеренные сеточные токи по своей величине не превышают 10% от величины анодного тока. При $V_G < -5\text{ В}$ через триод продолжает протекать остаточный ток, составляющий от максимального тока триода приблизительно 0.1 часть. Наличие остаточного тока объясняется не только наличием тока высокоэнергетических первичных электронов, но и зарядкой алмазной пленки. Дело в том, что существующие технологии формируют алмазные пленки с концентрацией центров захвата электронов $\approx 1\text{ ppm}$ [8]. Сейчас имеется только одна фирма „Element six“ [9], которая разработала технологию роста алмазных пленок и монокристаллов с концентрацией центров захвата $\approx 1\text{ ppb}$. Алмазный материал с такой концентрацией называется „электронным алмазом“ и характеризуется высокой подвижностью электронов и дырок. Оценки показывают, что при концентрации центров захвата

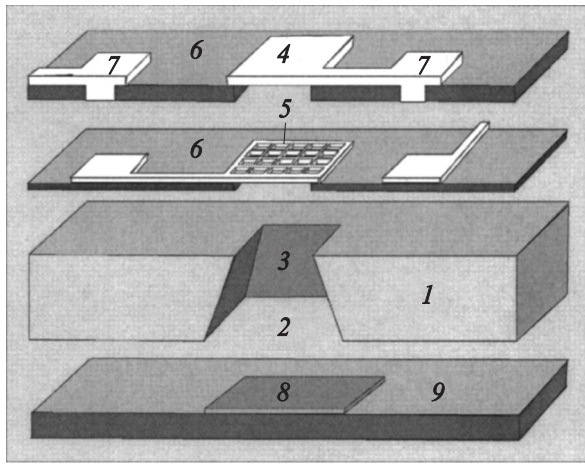


Рис. 3. Конструкция интегрального вакуумного эмиссионного триода: 1 — УКЭ, выполняющий роль катода 2, 3 — слой поликристаллического алмаза p -типа, 4 — анод, 5 — затвор, выполненный в виде сетки, 6 — диэлектрический слой, 7 — контактные площадки для перехода с одного уровня разводки на другой, 8 — автоэмиссионный катод, 9 — подложка, на которой располагается автокатод.

≈ 1 ррВ напряжение переключения будет определяться только энергией вторичных электронов и составит $\approx 1-3$ В, а остаточный ток будет определяться только током высокоэнергетичных первичных электронов и составит от максимального тока всего $\sim 3\%$.

Из ВАХ триода следует, что ВЭТ может использоваться для построения как аналоговых схем (например, усилителей), так и логических элементов цифровой техники (инвертора, триггера и т.д.), причем управляющие напряжения будут соответствовать напряжениям, используемым в ИС.

На рис. 3 представлена конструкция интегрального вакуумного эмиссионного триода (ИВЭТ), которая может служить основой вакуумных ИС. В кремниевой пластине (1) сформирован УКЭ, выполняющий роль катода (2). Стенки УКЭ покрыты слоем поликристаллического алмаза p -типа (3). Положительное напряжение, приложенное к аноду (4), создает поле, под действием которого электроны из УКЭ

двигаются к аноду, создавая анодный ток. Управление этим током осуществляется затвором (5), выполненным в виде сетки. Затвор (5) отделен от анода и кремниевого основания диэлектрическим слоем (6). Контактные площадки (7) обеспечивают переход с одного уровня разводки на другой. В качестве источника первичных электронов (8) можно использовать любой автоэмиссионный катод, поскольку в предлагаемом устройстве необходимую плотность тока обеспечивает УКЭ. Первичный источник может быть общим для всей интегральной схемы или сформирован под каждым триодом на общей подложке (9), как это показано на рис. 3. В качестве материала для УКЭ можно использовать не только кремний, но и поликристаллические алмазные пластины или даже монокристаллические. Последнее важно, если интегральные схемы должны работать в температурном диапазоне 200–500°С или генерировать СВЧ большой мощности.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела профессора А.Т. Рахимова (ИЯФ МГУ) за помощь в формировании алмазного покрытия УКЭ.

Список литературы

- [1] Викулов Н., Кичаева Н. // Электроника НТБ. 2008. № 5. С. 70–74.
- [2] David S.Y.Hsu. // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 2988–2990.
- [3] Li D., Zhang J. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2001. V. 19 (5). P. 1820–1823.
- [4] Sohn J.I., Lee S. // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. P. 287–290.
- [5] Ha J.K., Chung B.H., Han S.Y. et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. V. 20 (50). P. 2080–2084.
- [6] Jonge N., Bonard J.-M. // Phil. Trans. R.Soc. Lond. 2004. V. 362. P. 2239–2266.
- [7] Ильичев Э.А., Кулешов А.Э., Полторацкий Э.А., Рычков Г.С. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 1. С. 44–51.
- [8] Ральченко В.В., Конов В.В. // Электроника НТБ. 2007. № 4. С. 58–67.
- [9] <http://www.e6cvd.com>