

10;11;12

Умножитель-концентратор электронов для автоэмиссионной интегральной электроники

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

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

Поступило в Редакцию 13 июля 2009 г.

Описываются конструкция и технология изготовления умножителя — концентратора электронов (УКЭ), играющего роль автоэмиссионного катода и обеспечивающего существенное повышение плотности тока по сравнению с существующими эмиттерами. УКЭ за счет специальной конструкции и использования алмазной пленки концентрирует и увеличивает количество электронов так, что экспериментально удалось повысить плотность первичного потока электронов в 25–30 раз. Обсуждается возможность создания интегральных схем на основе предложенного устройства.

Спутниковая связь, радиолокация и цифровое телевидение ставят перед электроникой задачу освоения частотного диапазона в несколько сотен гигагерц. Для решения этой задачи необходимо разработать активные элементы (диоды, транзисторы, триоды) соответствующего быстродействия, а это возможно, если рабочие токи этих элементов имеют плотность, превосходящую 10 A/cm^2 .

Другой важной задачей, стоящей перед электроникой, 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, которая возникла несколько десятилетий назад, как катоды Спиндта [1]. В настоящее время в автоэмиссионную электронику вкладывают большие средства, поддерживая и развивая ряд крупных проектов [2]. Основной причиной, сдерживающей внедрение автоэмиссионной электроники в промышленность, является отсутствие надежных и мощных автоэмиттеров, обеспечивающих плотность эмис-

сионного тока в десятки ампер на квадратный сантиметр. С появлением углеродных нанотрубок (УНТ) казалось, что проблема будет решена [3–6]. Однако выяснилось, что эмиттеры на основе УНТ, получаемые методом газофазного осаждения (CVD), имеют малую плотность тока и недостаточную стабильность [7].

Все, что имеется на рынке, — это эмиттеры, полученные на основе композиционных материалов, состоящие из УНТ диаметром 1–5 нм и наночастиц размером 10–50 нм. Максимальная плотность тока этих эмиттеров не превышает 0.1 A/cm^2 , и при непрерывной работе 100 h плотность тока уменьшается вдвое.

Существуют и другие типы автоэмиттеров, которые исследовались в течение последних 10 лет [8]. Но реализовать их промышленный выпуск не удалось из-за невоспроизводимости, нестабильности и малой плотности эмиссионного тока.

Оригинальный подход в построении эмиссионной электроники предлагает группа Novatrans Group SA [9]. Но и в этом случае пока получены малые плотности тока (менее 10^{-3} A/cm^2).

Несомненным достижением автоэмиссионной электроники в последние годы является создание катодов на основе эффекта поверхностно эмиттируемых электронов (Surface conduction electron emission [10]). Хотя ток и здесь небольшой, зато конструкция катода хорошо подходит для создания плоских автоэмиссионных экранов, превосходящих по своим характеристикам жидкокристаллические экраны. Такие экраны реализованы фирмой „Canon“ совместно с фирмой „Toshiba“.

В данной работе предлагается построение автоэмиссионной электроники на основе умножителя-концентратора электронов (УКЭ).

УКЭ представляет собой 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 небольшой работы выхода электрона у алмаза покидают пленку и образуют в отверстии электронный газ, который под действием электрического поля и диффузии выходит через узкую часть отверстия.

На рис. 1, *a* изображена одна из возможных конструкций УКЭ, а на рис. 1, *b–d* — ее реализация в кремниевой пластине толщиной $470 \mu\text{m}$. Отверстие формируется селективным травлением и имеет

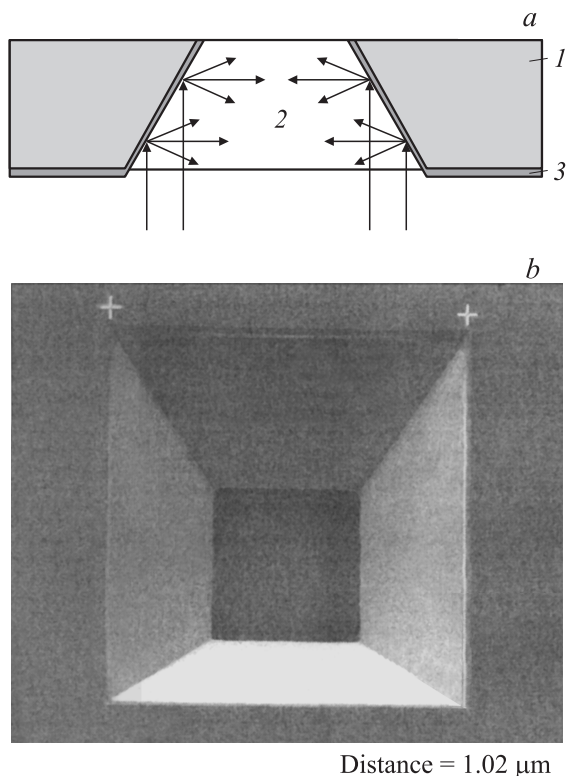
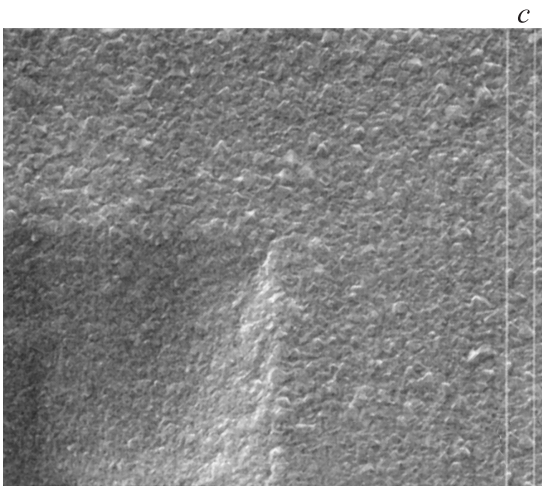


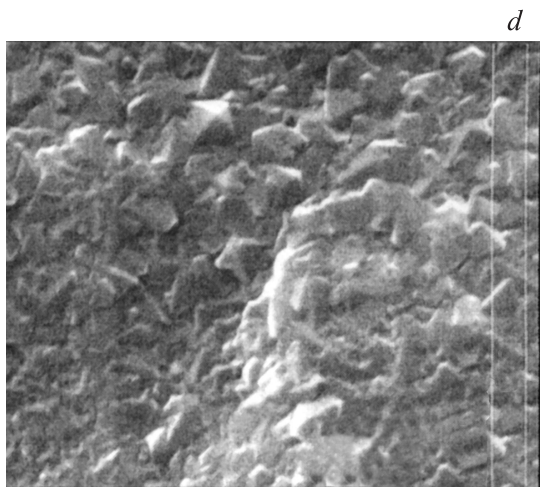
Рис. 1. Конструкция УКЭ (а): 1 — кремниевая пластина, 2 — сквозное отверстие, 3 — алмазная поликристаллическая пленка; изображение УКЭ (b) и алмазной поликристаллической пленки (c, d) в электронном микроскопе.

форму четырехгранной усеченной пирамиды, грани которой наклонены к основанию под углом $\alpha = 54.7^\circ$. Входное отверстие имеет размер $1.1 \times 1.1 \text{ mm}$.

Методом CVD [11] на стенках отверстия выращена поликристаллическая алмазная пленка p -типа проводимости толщиной $3\text{--}5 \mu\text{m}$ (рис. 1, c, d). При падении на алмазную пленку первичного электрона (рис. 1, a) в ней рождаются пары электрон–дырка в количестве N , приблизительно даваемом соотношением $N = E_1/3E_g$, где E_1 — энергия



Distance = 3.00 μm



Distance = 1.01 μm

Рис. 1 (продолжение).

падающего электрона, а E_g — величина запрещенной зоны. Для алмаза $E_g = 5.49$ eV, поэтому при $E_1 = 1$ keV каждый первичный электрон рождает приблизительно 60 вторичных электронов. Из них часть доходит до поверхности пленки и выходит в вакуум [11]. Если электроны рождаются в поверхностном слое толщиной не более диффузионной длины электрона L , то доля h вторичных электронов, выходящих в вакуум, может составлять $h = 0.3-0.5$ [12]. Энергия вторичных электронов в вакууме не превышает 0.5 eV. Исходя из зависимости глубины проникновения первичных электронов от энергии электрона E_1 [12], легко получить оптимальную энергию первичного электрона E_{opt} , дающую максимальное число вторичных электронов:

$$E_{\text{opt}}[\text{keV}] = \left(\frac{25L\rho\Gamma(m^{-1} + 1)}{\sin\alpha} \right)^{0.625},$$

здесь $\Gamma(x)$ — гамма-функция, $m \approx 1.9$. Для алмаза $\rho = 3.51$ g/cm³. Для $\alpha = 54.7^\circ$ имеем $E_{\text{opt}}[\text{keV}] \approx 17.3L^{0.6}$, где L берется в μm . Следовательно, максимальное число вторичных электронов будет $N_{\text{max}} \approx 1.2 \cdot 10^3 hL^{0.6}$. Диффузионная длина электронов в поликристаллической алмазной пленке толщиной 3–5 μm , полученной методом CVD, лежит в диапазоне $0.016 \mu\text{m} \leq L \leq 0.16 \mu\text{m}$ [12]. Отсюда при $h = 0.3$ получаем $30 \leq N_{\text{max}} \leq 120$.

За счет вторичных электронов в отверстии УКЭ возникает электронный газ, генерируемый со скоростью, превышающей скорость поступления первичных электронов в N_g раз, где N_g может равняться N_{max} . В идеальном случае можно выводить электроны со скоростью их рождения. Все зависит от диффузионной и полевой составляющих потока электронов, выводимых из УКЭ.

Для экспериментального исследования УКЭ на его вход при вакууме $4.5 \cdot 10^{-7}$ Торр подавался поток электронов с равномерной плотностью по сечению. При этом диаметр сечения составлял 2 mm, а энергия электрона –0.9 keV. На расстоянии 100 μm от выхода УКЭ располагался анод, на который по отношению к УКЭ подавалось напряжение E_A от –2 V до +20 V. При $E_A = -2$ V на анод попадали только высокоэнергетичные первичные электроны, так как вторичные электроны в силу их небольших энергий не могли преодолеть тормозящее действие поля, создаваемое анодом. По мере увеличения напряжения E_A ток анода возрастал за счет тока вторичных электронов.

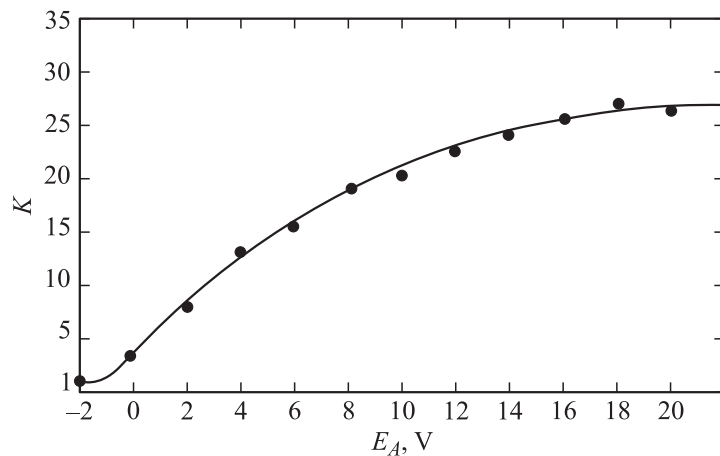


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления плотности тока K от напряжения на аноде E_A .

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента усиления плотности тока электронов, выходящих из УКЭ, от напряжения на аноде E_A . Коэффициент усиления определялся как отношение тока анода к току высокоэнергетичных первичных электронов. Из рис. 2 видно, что плотность тока на выходе УКЭ возрастает почти в 30 раз. С одной стороны, такое усиление вызвано рождением вторичных электронов, а с другой — их концентрацией. Поскольку отношение площади входного отверстия УКЭ к выходной равно ~ 5 , то максимальное усиление за счет концентрации получается равным 4, а следовательно, коэффициент умножения для первичных электронов оказывается не менее 7. В то же время из расчета следует, что этот коэффициент можно существенно увеличить при $E_1 = E_{\text{opt}} \geq 2 \text{ keV}$. Кроме того, по всей вероятности, поле анода не проникает на всю глубину отверстия УКЭ и, следовательно, не все вторичные электроны доходят до анода. И здесь еще есть дополнительный резерв увеличения плотности тока за счет оптимизации конструкции УКЭ, например, можно взять более тонкую пластину кремния.

На рис. 3 представлена конструкция вакуумного эмиссионного триода (ВЭТ). В кремниевой пластине 1 сформирован УКЭ, выполняющий

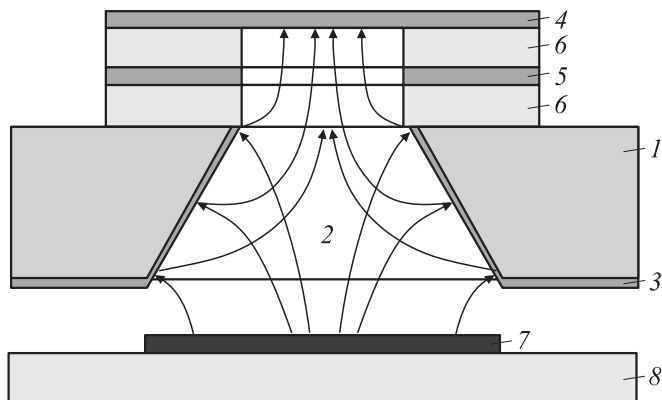


Рис. 3. Конструкция вакуумного эмиссионного триода: 1 — кремниевая пластина, 2 — сквозное отверстие, 3 — алмазная поликристаллическая пленка, 4 — анод, 5 — затвор, 6 — диэлектрик, 7 — источник первичных электронов, 8 — подложка, на которой формируются источники первичных электронов.

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. Поскольку энергия вторичных электронов не превышает 0.5 eV , то все рабочие напряжения триода должны быть меньше 10 V . Это также следует из экспериментальной кривой, приведенной на рис. 2. Затвор 5 отделен от анода и кремниевого основания диэлектрическим слоем 6 толщиной $\sim 30\text{ }\mu\text{m}$. Результаты испытаний ВЭП будут представлены в последующих публикациях.

Конструкция ВЭТ позволяет использовать технологию микроэлектроники и создавать на его основе автоэмиссионные интегральные схемы. В качестве источника первичных электронов 7 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 8, как это показано на рис. 3. В качестве материала для УКЭ можно использовать не только кремний, но и металлические или поликристаллические алмазные

пластины. Поскольку в предлагаемых автоэмиссионных устройствах используется только широкозонный алмаз, ожидается расширенный температурный диапазон ($-100 \div +300^\circ\text{C}$) и повышение стойкости к спецвоздействиям.

Авторы выражают благодарность сотрудникам отдела А.Т. Рахимова (ИЯФ МГУ), совместно с которыми изготовлены алмазные покрытия УКЭ.

Список литературы

- [1] *Spindt C.A.* // J. Appl. Phys. 1968. V. 39. N 7. P. 3504–3505.
- [2] *Вукулов Н., Кучаева Н.* // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2008. № 5. С. 70–74.
- [3] *David S.Y.Hsu* // Appl. Phys. Lett. 2002. V. 80. P. 2988–2990.
- [4] *Li D., Zhang J.* // J. Vac. Sci. Technol. B. 2001. V. 19 (5). P. 1820–1823.
- [5] *Sohn J.I., Lee S.* // Appl. Phys. A. 2002. V. 74. P. 287–290.
- [6] *Ha J.K., Chung B.H., Han S.Y.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2002. V. 20 (50). P. 2080–2084.
- [7] *Jonge N., Bonard J.-M.* // Phil. Trans R. Soc. Lond. 2004. V. 362. P. 2239–2266.
- [8] *Krauss A.R., Auciello J., Ding M.Q.* et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 2958.
- [9] *Diamant G., Halahmi E., Kronik L.* et al. // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. P. 262903.
- [10] *Li Y., Lo H.-Y.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 085301.
- [11] *Гаврилов С.А., Дзбановский Н.Н., Ильичев Э.А.* и др. // ЖТФ. 2004. Т. 74. С. 108–114.
- [12] *Dvorkin V.V., Dzbanovsky N.N., Gavrilov S.A.* et al. // Diamond Relat. Mater. 2003. V. 12. P. 2208–2218.