

13.4

Каскадный матричный усилитель электронного потока на основе умножителя-концентратора электронов

© Э.А. Ильичев¹, А.Е. Кулешов¹, П.В. Минаков², Г.Н. Петрухин¹, Г.С. Рычков¹,
А.Н. Демидова¹, Д.А. Корляков¹

¹ Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“, Москва, Зеленоград, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
E-mail: mstlena2@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 декабря 2022 г.

В окончательной редакции 7 декабря 2022 г.

Принято к публикации 3 февраля 2023 г.

Рассматриваются конструкция и работа каскадного матричного усилителя электронного потока на основе умножителя-концентратора электронов. В отличие от классических микроканальных пластин предлагаемый усилитель может обеспечить большую плотность выходного тока, что позволяет использовать его также как полевой катод в вакуумной микроэлектронике гига- и терагерцевого диапазонов.

Ключевые слова: микроканальная пластина, вторичная эмиссия, экранирование, умножитель-концентратор электронов, полевой катод.

DOI: 10.21883/PJTF.2023.07.54922.19454

Усилители электронного потока в развитии приборостроения играют фундаментальную роль, особенно в области разработки высокочувствительных усилителей слабых электронных потоков. Микроканальная пластина до сих пор занимает ведущее положение в этой области приборостроения [1,2]. Но из-за наличия высокоомных каналов и связанного с этим эффекта насыщения микроканальная пластина работает в диапазоне очень малых токов (не более μA) [3]. Для решения ряда задач требуются матричные усилители электронного потока, обеспечивающие плотность усиленного тока $10\text{--}100\text{ A/cm}^2$. Особенно перспективно применение таких усилителей в качестве полевых эмиттеров при разработке вакуумных микроэлектронных схем высокого быстродействия [4]. В этом плане хорошо подходят матричные усилители, функционирующие на основе вторичной эмиссии электронов из алмазной пленки. Элементарной ячейкой такого усилителя является умножитель-концентратор электронов (ЕМС) [5]. ЕМС представляет собой сквозное сужающееся отверстие в проводящей пластине, стенки которого покрыты поликристаллическим алмазом p -типа. Первичный поток электронов, проникающий в отверстие со стороны ее широкой части, падает на стенки и рождает вторичные электроны в алмазе, часть из которых в силу небольшой работы выхода электрона из алмаза покидает пленку и под действием электрического поля выходит через узкую часть отверстия. На рис. 1, *a* представлены (слева и справа соответственно) снимки матричного усилителя электронного потока (МЕФР) и его ячейки ЕМС, сформированной в кремниевой пластине толщиной $470\text{ }\mu\text{m}$. МЕФР имеет коэффициент усиления $30\text{--}50$, но чтобы усилить слабый

начальный ток до тока с плотностью 100 A/cm^2 и более нужно поднять усиление до $10^3\text{--}10^6$, что возможно лишь при последовательном (каскадном) использовании МЕФР с точным согласованием выходов ЕМС на одном МЕФР со входами аналогичного ЕМС следующего МЕФР (рис. 1, *b*, слева). Однако при такой конструкции вторичные электроны, обладающие при эмиссии из алмазной пленки энергией менее 1 eV , попадая в сильное поле от предыдущего МЕФР, снова возвращаются в алмазную пленку, из которой они вышли. Последнее можно устранить, закрывая входы ЕМС графеновой пленкой, которая свободно пропускает электроны с энергией более 100 eV [6]. К сожалению, при энергии менее 100 eV электроны начинают поглощаться графеновой пленкой, а это приводит к требованию однородности графеновой пленки для всех ячеек ЕМС. В идеальном случае графен должен быть однослойным, но в настоящее время нет устойчивой технологии получения такой пленки с площадью более 1 mm^2 . Использование пленки с неоднородной толщиной приведет к разбросу усиления между ЕМС, что недопустимо для электронного потока, несущего двумерную информацию.

В работе рассматривается способ экранирования, лишенный указанных недостатков. Он достигается тем, что МЕФР зеркально прикрывается от предыдущего МЕФР таким же МЕФР (обозначенным как МЕФР*, рис. 1, *b*, справа). МЕФР* отличается от МЕФР не только зеркальным положением, но и отсутствием алмазной пленки и покрытием поверхности со стороны выходов ЕМС диэлектриком, отмеченным на рис. 1, *b* зеленым цветом (цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи). Предлагаемую конструкцию далее будем

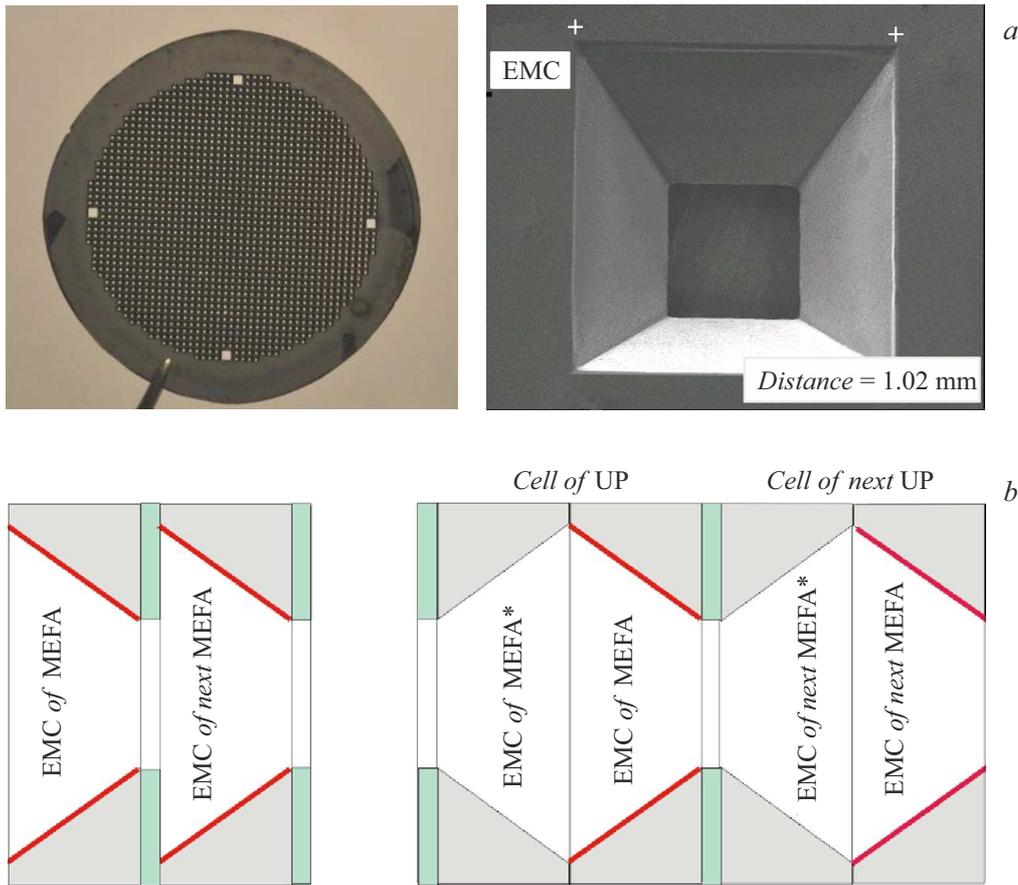


Рис. 1. *a* — матричный усилитель электронного потока MEFP (слева) и ячейка MEFP — умножитель-концентратор электронов EMC (справа); *b* — простая конструкция каскадного усилителя (слева) и конструкция каскадного усилителя с нейтрализацией влияния электрического поля предыдущего MEFP (справа).

называть усилителем потока и обозначать как UP, подразумевая при этом под ячейкой UP пару, образуемую EMC основного MEFP и EMC зеркального MEFP*.

Покажем, что необходимого усиления можно достичь при каскадном использовании UP. Для этого, используя программу „SIMION-8“, исследуем траектории электронов при их переходе из ячейки предыдущего UP1 в ячейку следующего UP2 (рис. 2, размеры даны в mm). Исследуемый фрагмент каскадного усилителя имеет осевую симметрию относительно линии OO' . Ячейки UP1 и UP2 рассматриваются соответственно также и как электроды 2 и 3, слева и справа от которых расположены электроды 1 и 4, предназначенные для проверки эффективности экранировки. U_i — напряжение на i -м электроде ($i = 1-4$). Траектории электронов и эквипотенциали электрического поля получены при напряжениях

$$U_1 = 0.3U_2, \quad 2U_2 = U_3, \quad U_4 = 1.3U_3 \quad (1)$$

и $U_2 = 500$ V. Начальная энергия вторичных электронов у поверхности алмазной пленки ячейки UP1 из-за ее малости полагалась равной 0 eV [7]. Числа, набранные курсивом, показывают значения (в kV) электрического

потенциала эквипотенциалей, отмеченных точками. Из анализа траекторий следует, что электроны, выходя из полости ячейки UP1, приобретают энергию, приблизительно равную $qU_3 - qU_2$ (здесь и далее q — заряд электрона), и с этой энергией воздействуют на алмазную пленку ячейки UP2, порождая уже в этой ячейке вторичные электроны. Покрытые алмазной пленкой поверхности ячеек UP1 и UP2 можно рассматривать с геометрической точки зрения как идентичные множества точек G_1 и G_2 , а траектории — как отображение f множества G_1 в G_2 . При отождествлении G_1 с G_2 имеем $fG_1 \subset G_1$. Из теории о множествах (например, из теоремы Кантора [8]) следует, что в этом случае последовательное применение отображения f даст инвариантное множество, преобразующееся само в себя. В нашем случае это значит, что в цепочке из усилителей UP вторичные электроны будут рождаться, а затем (в следующем UP) воздействовать на алмазную пленку в границах одной и той же области.

Геометрия траекторий электронов и эквипотенциалей электрического поля не меняется, если с точностью до аддитивной постоянной выполняется условие (1). Важно, чтобы на характер отображения $fG_1 \subset G_1$ мало

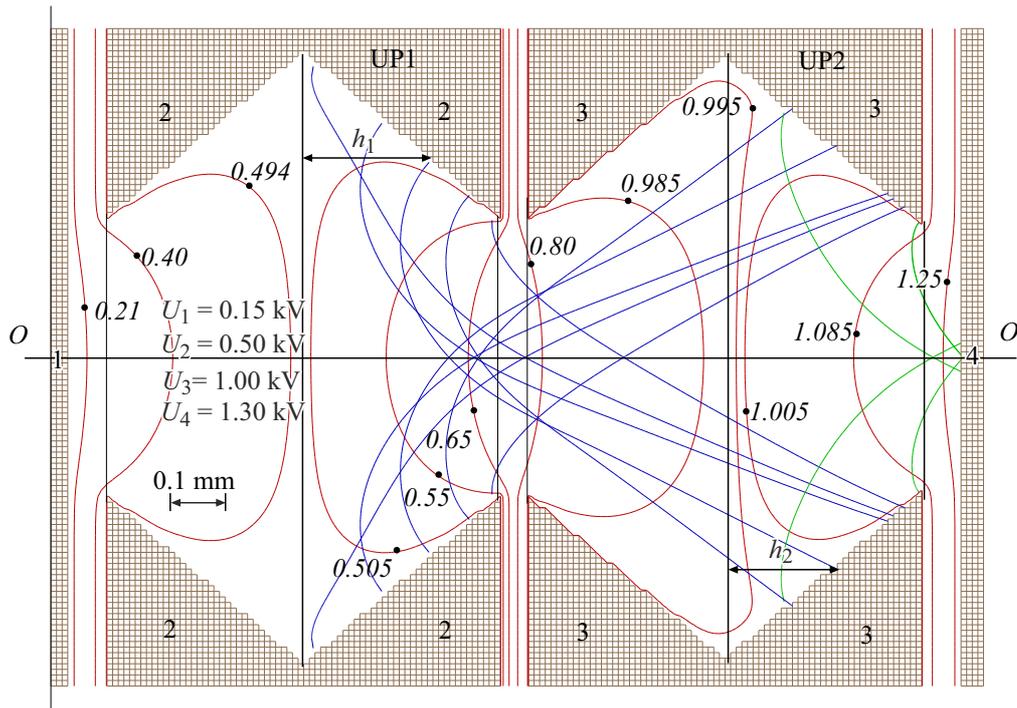


Рис. 2. Расположение траекторий электронов (синие линии) и эквипотенциалей электрического поля (коричневые линии) в ячейках UP1, UP2 и между ними. Зеленые линии — траектории вторичных электронов, выходящих из ячейки UP2 под действием электрического поля, создаваемого электродом 4. Цветной вариант рисунка представлен в электронной версии статьи.

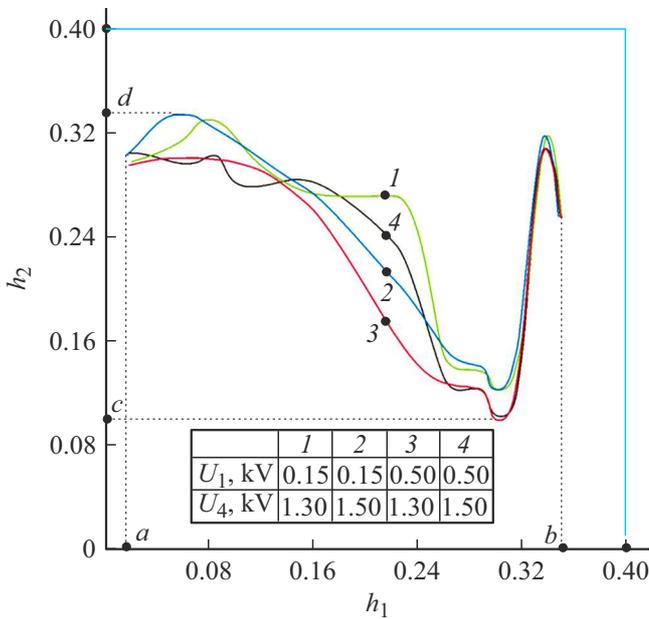


Рис. 3. Графики функций $h_2 = g(h_1, U_1, U_4)$ при фиксированных U_1 и U_4 .

влияли напряжения U_1 и U_4 при условии $U_1 < U_2$ и $U_3 < U_4$, что имеет место при каскадном объединении UP. Для проверки степени влияния этих напряжений была исследована зависимость $h_2 = g(h_1, U_1, U_4)$, где h_1

и h_2 — соответственно расстояния от начальной и конечной точек траектории до оснований усеченных конусов, покрытых алмазной пленкой (рис. 2). Величины h_1 и h_2 однозначно не определяют точки во множествах G_1 и G_2 , но однозначно определяют окружности O_{h_1} и O_{h_2} , удаленные от оснований усеченных конусов на расстояния h_1 и h_2 соответственно, что достаточно для определения характера отображения f множества G_1 в G_2 . При фиксированных U_1 и U_4 на рис. 3 представлены графики функции $h_2 = g(h_1, U_1, U_4)$. Видно, что при $h_1 \in [a, b]$ всегда $h_2 \in [c, d]$, причем $a < c$ и $b > d$, а это значит, что при выбранных внешних напряжениях и отождествлении G_1 с G_2 справедливо $fG_1 \subset G_1$, т.е. необходимое условие выполнено. Незначительность влияния U_1 и U_4 на отображение f связано с тем, что характер траекторий в основном определяется напряжениями на UP1 и UP2. Так, при $U_2 = 500 \text{ V}$ и $U_3 = 1000 \text{ V}$ траектории в основном находятся в области, ограниченной эквипотенциалами 505 V и 995 V.

Все расчеты проводились при предположении осевой симметрии ячеек UP. Однако характер поведения электронов сохраняется и при форме EMC в виде усеченной пирамиды.

При изменении U_i ($i = 1-4$) и выполнении условия (1) с точностью до аддитивной составляющей траектории сохраняют свой вид, меняется только энергия электрона $E_q = (U_3 - U_2)q$, от которой зависит коэффициент вторичной эмиссии $K_q(E_q)$. Если каскадный усилитель состоит из n каскадов UP $_i$ ($i = 1-n$), то его

коэффициент усиления будет $K_M = \prod_{i=2}^n K_i$, где K_i — коэффициент усиления в i -м каскаде. Важным параметром является подаваемое на усилитель напряжение U_f и его оптимальное распределение между каскадами для получения максимального K_M . Используя метод Лагранжа, получаем, что распределение должно быть равномерным, т. е. разность напряжений между каскадами должна быть $U_f/(n-1)$ и, следовательно, $K_i = K_q(qU_f/(n-1))$ ($i = 2-n$). Но при фиксированном U_f число n может быть не оптимальным. Нахождение оптимального n_{\max} сводится к определению максимума функции $K_M(n) = (K_q(qU_f/(n-1)))^{n-1}$ от n . В работе [7] найдена зависимость K_q от E_q . В первом приближении ее можно представить как $K_q = gE_q$, где $g = 0.02-0.05 \text{ eV}^{-1}$, если энергия электрона измеряется в eV. Легко найти, что $n_{\max} = [gqU_f/e] + 1$ и $K_{\max} = \exp(n_{\max} - 1)$. Здесь e — неперово число ($e = 2.7\dots$), а квадратные скобки обозначают целую часть числа, заключенного в эти квадратные скобки. При $U_f = 1 \text{ kV}$ имеем $n_{\max} = 8-19$ и $K_{\max} \approx 10^3-6 \cdot 10^7$. При ограничении $n < n_{\max}$ исходя из монотонного возрастания $K_M(n)$ для этих n следует брать наибольшее n .

Итак, каскадный матричный усилитель просто получается при каскадном использовании усилителей UP_{*i*} ($i = 1-n$), плотно прилегающих друг к другу. Подводку напряжений U_i можно осуществить несколькими способами, одним из которых является подача через боковые лепестковые контакты, сформированные в едином технологическом цикле с МЕРР.

Представляет интерес разработка UP с ячейками минимальных размеров, которые зависят от уровня микроэлектронной технологии. Рассмотрим случай, когда ЕМС в форме усеченной пирамиды формируется в кремниевой пластине толщиной d . В этом случае при соотношении оснований усеченной пирамиды 1:4 размер W стороны входного основания ЕМС равен $W = 4d \text{ ctg } 54.7^\circ \approx 2.8d$. Передовые зарубежные компании работают с пластинами толщиной 50–100 μm [9]. Ряд фирм, например фирма Wafer World, производит пластины толщиной 10–30 μm и диаметром не менее 25.4 mm [10]. При использовании пластин толщиной 10 μm получаем $W \approx 28 \mu\text{m}$, что дает плотность ячеек $\sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$. Естественно, что в этом случае алмазное покрытие должно быть нанокристаллическим. Уменьшения ячеек можно также достичь за счет использования поликристаллических и монокристаллических алмазных мембран p -типа проводимости. Последнее позволяет получить и максимальную плотность выходного тока, и высокую плотность ячеек, превышающую 10^7 cm^{-2} .

Как отмечалось выше, использование пленок графена надежно решает задачу экранирования, но при этом требуется их однородность. В настоящее время отработанной технологии получения пленок площадью более 1 mm^2 нет, хотя в лабораторных условиях получены монокристаллы графена площадью $\sim 10 \text{ mm}^2$ [11]. Более того, экспериментально была получена матри-

ца из 12 000 монокристаллов графена, которая была перенесена на кремниевую пластину [12]. Все это в перспективе обещает разработку более компактного и более эффективного каскадного матричного усилителя электронного потока.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-38-90125.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] T. Cremer, B.W. Adams, M. Aviles, C. Lyashe, J. Minot, M.A. Popecki, T. Rivera, M.E. Stochaj, A.U. Mane, J.W. Elam, M. Gebhard, O.H. Siegmund, Proc. SPIE, **11118**, 111180M (2019). DOI: 10.1117/12.2530037
- [2] L. Giudicotti, M. Bassan, R. Pasqualotto, A. Sardella, Rev. Sci. Instrum., **65** (1), 247 (1994). DOI: 10.1063/1.1144791
- [3] А.Б. Беркин, В.В. Васильев, ЖТФ, **78** (2), 130 (2008). [A.B. Berkin, V.V. Vasil'ev, Tech. Phys., **53** (2), 272 (2008). DOI: 10.1134/S1063784208020217].
- [4] Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Г.Н. Петрухин, П.В. Минаков, Г.С. Рычков, В.В. Сень, Е.Г. Теверовская, Письма в ЖТФ, **47** (10), 3 (2021). DOI: 10.21883/PJT.F.2021.10.50963.18705 [E.A. Il'ichev, A.E. Kuleshov, G.N. Petrukhin, P.V. Minakov, G.S. Rychkov, V.V. Sen', E.G. Teverovskaya, Tech. Phys. Lett., **47**, 503 (2021). DOI: 10.1134/S1063785021050230].
- [5] E.A. Il'ichev, A.E. Kuleshov, E.A. Poltoratsky, G.S. Rychkov, Diamond Rel. Mater., **20** (1), 23 (2010). DOI: 10.1016/j.diamond.2010.11.002
- [6] E. Il'ichev, V. Khaustov, A. Kuleshov, D. Migunov, P. Minakov, R. Nabiev, G. Petrukhin, E. Teverovskaya, G. Rychkov, Diamond Rel. Mater., **94**, 209 (2019). DOI: 10.1016/j.diamond.2019.03.005
- [7] V.V. Dvorkin, N.N. Dzbanovsky, N.V. Suetin, E.A. Poltoratsky, G.S. Rychkov, E.A. Il'ichev, S.A. Gavrillov, Diamond Rel. Mater., **12** (12), 2208 (2003). DOI: 10.1016/S0925-9635(03)00320-0
- [8] П.С. Александров, Введение в теорию множеств и общую топологию (Наука, М., 1977), с. 183.
- [9] Д. Боднар, Компоненты и технологии, № 11, 116 (2012).
- [10] J.-E. Hong, Y. Lee, S.-I. Mo, H.-S. Jeong, J.-H. An, H.-E. Song, J. Oh, J. Bang, J.-H. Oh, K.-H. Kim, Adv. Mater., **33** (41), 2103708 (2021). DOI: 10.1002/adma.202103708
- [11] S.B. Salk, R.R. Pandey, P.H.Q. Pham, D. Zhou, W. Wei, G. Cochez, D. Vignaud, E. Pallechi, P.J. Burke, H. Happy, Nanomaterials, **11** (10), 2528 (2021). DOI: 10.3390/nano11102528
- [12] M.A. Giambra, V. Mišėikis, S. Pezzini, S. Marconi, A. Montanaro, F. Fabbri, V. Sorianoello, A.C. Ferrari, C. Coletti, M. Romagnoli, ACS Nano, **15** (2), 3171 (2021). DOI: 10.1021/acsnano.0c09758