

13.4

Алмазные фотокатоды как полевые катоды для вакуумной микроэлектроники

© Э.А. Ильичев¹, А.Е. Кулешов¹, Г.Н. Петрухин¹, П.В. Минаков², Г.С. Рычков^{1,¶},
В.В. Сень³, Е.Г. Тверовская¹

¹ Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва, Зеленоград, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³ Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН, Москва, Россия

¶ E-mail: mstlena2@mail.ru

Поступило в Редакцию 11 января 2021 г.

В окончательной редакции 2 февраля 2021 г.

Принято к публикации 3 февраля 2021 г.

Анализируется использование алмазных фотокатодов и усилителей потока электронов в высокочастотной вакуумной микро- и нанoeлектронике. В качестве основных приборов рассматриваются вакуумный микро-триод и электронная пушка для интегральной лампы бегущей волны.

Ключевые слова: алмазный фотокатод, фотоэлектронная эмиссия, вторичная эмиссия, умножитель-концентратор электронов, вакуумный микро-триод.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.10.50963.18705

Потребность в высокочастотных приборах (вплоть до 1 THz) в различных областях науки и техники постоянно растет [1,2]. Они необходимы для связи при плохих погодных условиях, для интроскопии неметаллических объектов в системах контроля, разработки радиационно стойких устройств и т.д. Существующие приборы этого диапазона либо имеют большие габариты (как гиротроны и лазеры на свободных электронах), либо сложны в производстве и эксплуатации (как квантово-каскадные лазеры). У твердотельных приборов [3] при частотах более 100 GHz мощность начинает падать в зависимости от частоты как $1/f^2$, а затем как $1/f^3$. Для преодоления этих затруднений разработчики аппаратуры пытаются использовать вакуумную электронику [1,2], которая является стойкой к высокому уровню радиации. В ряде стран осуществляются программы разработки высокочастотной интегрированной вакуумной электроники (high frequency integrated vacuum electronics, HiFIVE) [2]. В этих программах разработка катодов, обеспечивающих плотность тока 100–500 A/cm² и более, занимает важное место [1,4]. Из-за отсутствия надлежащих полевых катодов пока используются термокатоды, а это значительно затрудняет интегрирование вакуумных приборов.

В 2008 г. израильские ученые предложили использовать в вакуумных микро-триодах (ВМТ) фотокатоды [5], аргументируя это тем, что, во-первых, в отличие от термокатодов они не ограничивают интеграцию, а во-вторых, для них в отличие от полевых катодов не нужны высокие напряжения и высокий вакуум $\sim 10^{-9}$ – 10^{-10} Торг. Используемый на тот момент фотокатод Cs₃Sb не мог обеспечить достаточную плотность тока, а следовательно, и высокочастотность ВМТ [5–7]. В настоящей работе продолжено исследование, связан-

ное с применением фотокатодов, но в качестве катодов предлагается использовать алмазные фотокатоды (АФК) [8] и усилители-концентраторы электронов (УКЭ) [9], которые позволяют получить необходимую плотность электронного потока.

При использовании технологии формирования алмазных пленок на кремнии [10] на сапфировой подложке с нанометровым слоем кремния была выращена поликристаллическая алмазная пленка *p*-типа проводимости толщиной 0.5 μ m. Полученная структура представляет собой алмазный фотокатод на сапфире (АФКС). Вакуумный ультрафиолет (ВУФ), проникая через сапфировую подложку в алмаз, генерирует в зоне проводимости фотоэлектроны, которые, выходя в вакуум, образуют фототок I_A . Величина I_A зависит от небольшого потенциального барьера, возникающего на поверхности пленки, и поэтому I_A легко управляется напряженностью электрического поля E_e у этой поверхности. На рис. 1, *a* представлена зависимость I_A от E_e , а в таблице приведены эмиссионные характеристики полевых катодов для высокочастотных приборов [11–13]. Видно, что из-за малых напряженностей электрического поля АФКС является подходящим полевым эмиттером для приборов микро- и нанoeлектроники. Возможная конструкция цилиндрического ВМТ, представленная на рис. 1, *b*, легко реализуется на основе микроэлектронной технологии. На рис. 2, *a* показаны эквипотенциали электрического поля и траектории электронов между катодом и анодом ВМТ, а на рис. 2, *b* — семейство анодных характеристик ВМТ, полученных с помощью программы „SIMION-8“. Вычисленная максимальная крутизна ВМТ g_m как функция d и I_{\max} (рис. 1, *a*) оказывается равной $g_m[A/V] = 1.8I_{\max}[A]/d[\mu m]$,

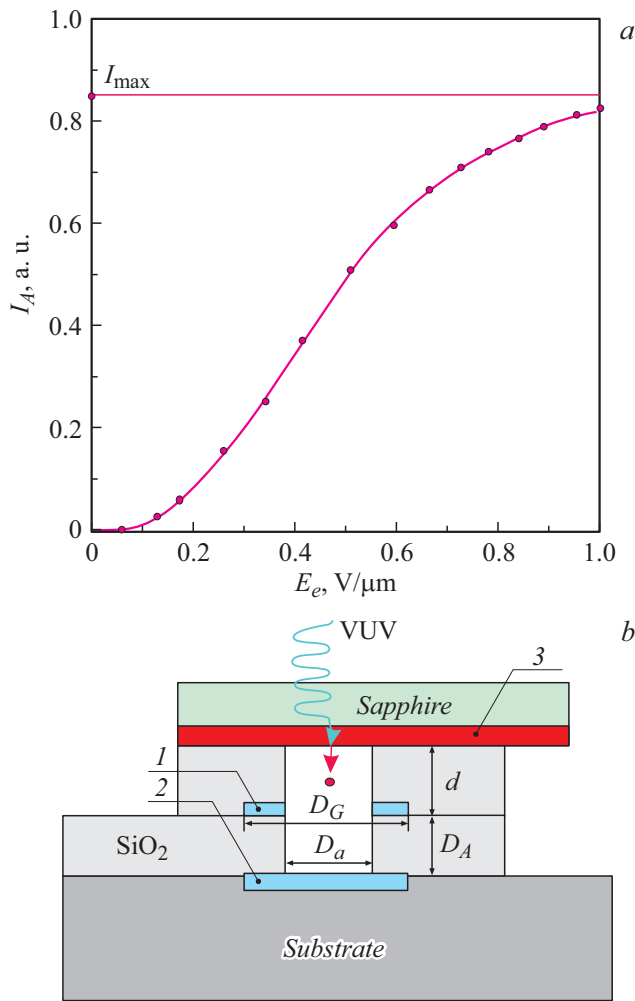


Рис. 1. *a* — зависимость I_A от напряженности поля E_e (I_{\max} — максимальный фототок, кружками отмечены измеренные значения тока). *b* — конструкция ВМТ: 1 — управляющий электрод, 2 — анод, 3 — АФКС; VUV — вакуумный ультрафиолет.

что дает для ВМТ коэффициент широкополосности $K_B = 0.9I_{\max}/\pi d(C_G + C_A)$ [14], где C_G — емкость управляющего электрода 1, а C_A — емкость анода 2 (рис. 1, *b*). Заменяя I_{\max} на плотность тока $I_{0\max}$ [A/cm²], при цилиндрической форме ВМТ и $D_t = d$, $D_G = 1.2d$, $D_A = 1.5d$ имеем C_G [pF] + C_A [pF] $\approx 0.19 \cdot 10^{-4}d$ [μm] и, следовательно,

$$K_B[\text{GHz}] \approx 0.12I_{0\max}[\text{A}/\text{cm}^2]. \quad (1)$$

Отсюда следует, что K_B определяется плотностью тока $I_{0\max}$, а последняя зависит от мощности излучения и квантовой эффективности фотокатода. В качестве источника ВУФ можно использовать дейтериевую лампу, например X2D2 фирмы HAMAMATSU, мощность излучения которой при диаметре луча 0.5 mm в диапазоне 170–240 nm составляет ~ 1.78 mW и превышает эту мощность более чем на порядок в диапазоне 120–240 nm. При размерах ВМТ ~ 0.1 – 1 μm на площади круга диаметром 0.5 mm можно разместить

$\sim 10^4$ триодов, что достаточно для разработки сложной интегральной схемы и ее функциональной проверки на низких частотах.

Для проверки частотных свойств ВМТ следует сконцентрировать излучение на площади ~ 10 μm² и разместить на ней основные элементы цифровой техники: триггер или кольцевой генератор. Частота колебаний последнего характеризует быстродействие ВМТ. Лампа X2D2 и АФКС при концентрации облучения на площади ~ 10 μm² обеспечивают плотность тока эмиссии 500 A/cm² [8,15], что с учетом (1) дает $K_B \approx 60$ GHz. Дальнейшего увеличения плотности тока можно достичь, используя излучение лампы X2D2 в диапазоне 120–240 nm, для чего алмазную пленку следует сформировать на кремневой решетке как мембрану. Тогда плотность тока при концентрации излучения увеличится почти в 20 раз, и K_B достигнет величины ~ 1000 GHz. Открытый доступ излучения к алмазной пленке можно получить, используя матрицу

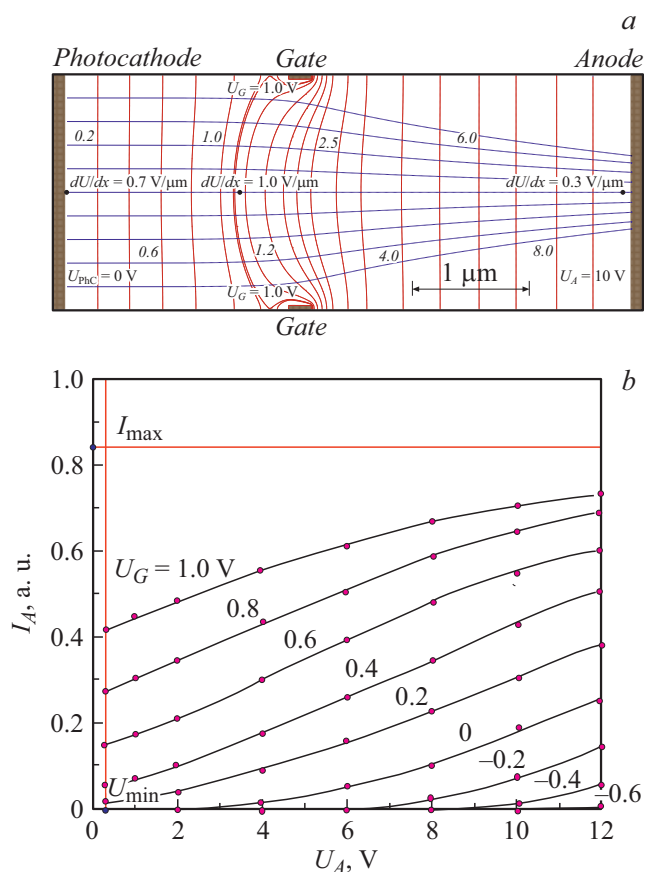


Рис. 2. *a* — эквипотенциали электрического поля и траектории электронов между катодом и анодом ВМТ при $D_t = d = 2$ μm, $D_A = 3$ μm, $U_G = 1$ V, $U_A = 10$ V. Значения величин $E_e = dU/dx$ относятся к месту, отмеченному темными точками. Числа, набранные курсивом, показывают значения (в V) потенциала ближайшей к ним эквипотенциали. *b* — семейство анодных характеристик ВМТ. U_{\min} — минимальное значение U_A , при котором вычислены значения I_A . Кружками отмечены вычисленные значения тока I_A .

Параметры полевых катодов для высокочастотных приборов ($I_{0\max}$ — максимальная плотность тока, E_{\max} — напряженность электрического поля при максимальном токе, S_{em} — площадь эмиссии)

| Изготовитель | Тип катода | $I_{0\max}, \text{A/cm}^2$ | $E_{\max}, \text{V}/\mu\text{m}$ | S_{em}, mm^2 |
|---|--|----------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Semiconductor Technologies R&D Laboratories, Japan [13] | Diamond emitter tip | 26.5 | 100 | Менее 0.01 |
| Vanderbilt University, Nashville, Tennessee, USA [11] | Diamond Field Tip Array Cathode (for 220 GHz TWT) | 15.0 | 40 | 0.1 |
| Lab. Optoelectronic Materials and Technol., Guangzhou, China [12] | Carbon-Nanotube Cold-Cathode (for THz Gyrotron) | 2.477 | 54 | 1 |
| HeatWave Labs, Inc. Watsonville, USA | TB-211 Field Emission Cathode | 0.1 | 10 | 1 |
| Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва, Россия | Алмазный фотокатод на сапфире (на кремневой решетке) | 0.68 (13.0) | 1 | 0.01 |

фотоприемных ячеек [8], где каждая ячейка представляет собой полость в форме усеченной пирамиды, стенки которой покрыты алмазной пленкой. В работе [9] рассмотрена конструкция вакуумного триода с катодом в виде такой ячейки, эмитирующей вторичные электроны под действием первичных электронов. Разумеется, роль последних может играть ВУФ.

С увеличением интенсивности ВУФ плотность тока может становиться значительно больше 1000 A/cm^2 . Возникает вопрос о надежности работы АФК. Положительный ответ следует из уникальной теплопроводности алмаза, являющегося основным элементом АФК. Как следует из работы [13], плотность тока, эмитируемая из вершин алмазных конусов с радиусами закругления $10\text{--}15 \text{ nm}$, может достигать более 10^4 A/cm^2 . Кроме того, авторы работы [5] полагают, что фотокатод на алмазной основе может стабильно работать при плотностях 3000 A/cm^2 .

Уменьшение размеров ВМТ сопровождается падением потребляемой энергии, так как рабочие напряжения пропорциональны величине d , и при $d = 0.1 \mu\text{m}$ они падают до $\sim 0.1\text{--}0.5 \text{ V}$.

При необходимости отдавать в нагрузку большую мощность достаточно подключить параллельно нужное число ВМТ, объединив их катоды, затворы и аноды. Получаемый в этом случае макротриод также удобно использовать для исследования характеристик ВМТ.

На быстрдействие ВМТ влияет время пролета электрона τ от катода до анода. При необходимости τ можно уменьшить, увеличивая рабочие напряжения или уменьшая размеры триода.

Все изложенное выше интересно с точки зрения исследования высокочастотной вакуумной микро- и наноэлектроники. Однако в плане практического использования из-за габаритного электропитания источника ВУФ и недостаточной мощности излучения, а следовательно,

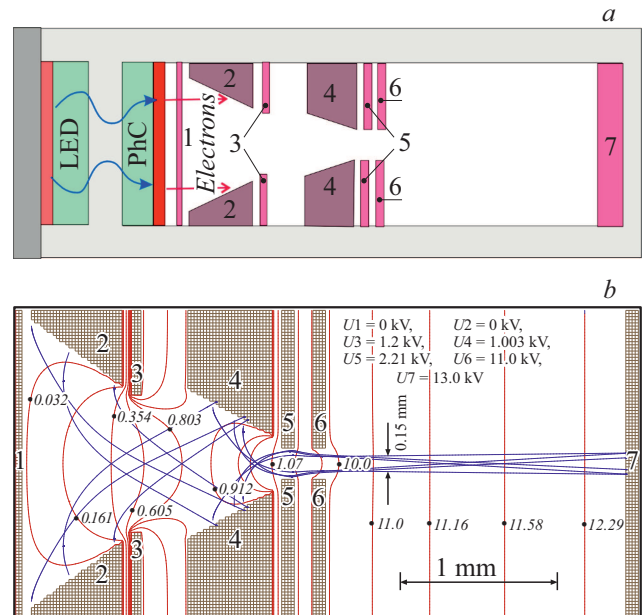


Рис. 3. a — конструкция электронной пушки. Пояснение в тексте. b — траектории электронов и эквипотенциалы электрического поля между электродами электронной пушки для интегральной ЛБВ. Числа, набранные курсивом, показывают значения (в kV) электрического потенциала эквипотенциалей, отмеченных точками.

недостаточной плотности тока это неприемлемо. Для устранения недостатков лучше формировать необходимый поток электронов усилением первичного потока электронов, генерируя последний, например, с помощью светодиода AlGaN UVC-LED и фотокатода GaN. Усилить поток электронов с энергией ϵ_e [eV] в $K \approx \epsilon_e/15$ раз можно посредством вторичной эмиссии электронов из алмаза [10]. УКЭ [9] является одним из таких усилителей. Проиллюстрируем это на возможной конструкции электронной пушки для интегральной лампы бегущей волны (ЛБВ) (рис. 3, а). Здесь LED — излучатель света AlGaN UVC-LED с длиной волны 250–300 nm и интенсивностью излучения 1–10 mW при размере излучающей поверхности $\sim 1 \text{ mm}^2$. Излучение падает на GaN-фотокатод (PhC) и рождает поток электронов 0.1–1 mA. Поток через экранирующий электрод 1 падает на УКЭ 2 и рождает вторичный поток электронов, который под действием потенциала U_3 электрода 3 ускоряется и падает на УКЭ 4, рождая третью генерацию электронов. Эти электроны благодаря электродам 5–7 и соответствующим им напряжениям U_5 , U_6 , U_7 формируют выходной электронный луч. Для проникновения электронов через электрод 1 он выполняется либо в виде сетки, либо в виде графеновой пленки [16]. При энергии первичных электронов 0.5–1 keV коэффициент усиления K составляет 10–30 [10]. Следовательно, двойное усиление увеличивает первичный фототок до 10–900 mA. Для конкретной геометрии электродов и напряжений с помощью программы „SIMION-8“ проведен расчет эквипотенциалей электрического поля и траекторий электронов между электродами пушки (рис. 3, б). Диаметр луча электронов, как видно из рисунка, составляет $\sim 0.15 \text{ mm}$, что при токе 10–900 mA дает плотность тока 57–5000 A/cm², этого вполне достаточно для применения рассматриваемого типа пушки в интегральных ЛБВ [2,4].

Проведенный анализ показал потенциальные возможности применения алмазных фотокатодов и усилителей-концентраторов потока электронов для развития высокочастотной вакуумной микро- и нанoeлектроники. Показана их перспективность не только в разработке интегральных схем на основе ВМТ, но и в области таких приборов, как интегральные ЛБВ. Следует отметить, что ВМТ почти полностью может быть сформирован из алмаза, а это гарантирует не только его работу при высоком уровне радиации, но и ввиду уникальной теплопроводности алмаза работу при высоких температурах. Последнее для решения ряда прикладных задач может оказаться более важным, чем быстроедействие.

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием бюджетных средств по госзаданию FSMR-2020-0018 и при поддержке Фонда содействия инновациям по проекту № 330ГР/23578.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Srivastava, Eur. J. Adv. Eng. Technol., **2** (8), 54 (2015).
- [2] М. Майская, Электроника: НТБ, № 6, 44 (2013).
- [3] G.P. Gallerano, S. Biedron, in *Proc. of the 2004 FEL Conf.*, ed. by R. Bakker, L. Giannessi, M. Marsi, R. Walker (Graphart TS, Trieste, Italy, 2004), vol. 1, p. 216.
- [4] A. Baig, L.R. Barnett, D. Gamzina, N.C. Luhmann, Jr., PIER Lett., **41**, 135 (2013).
- [5] G. Diamant, E. Halahmi, L. Kranik, J. Levy, R. Naaman, J. Roulston, Appl. Phys. Lett., **92** (26), 262903 (2008). DOI: 10.1063/1.2944267
- [6] C. Lee, Appl. Phys. Lett., **44** (5), 565 (1984). <https://doi.org/10.1063/1.94804>
- [7] J. Dai, C. Ruan, M. Wang, T. Miao, Y. Ding, in *2019 44th Int. Conf. on infrared, millimeter, and terahertz waves (IRMMW-THz 2019)* (Paris, France, 2019), p. 1. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2019.8874044
- [8] Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Р.М. Набиев, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, Е.Г. Теверовская, Письма в ЖТФ, **43** (7), 48 (2017). DOI: 10.21883/PJTF.2017.07.44468.16596
- [9] E.A. Il'ichev, A.E. Kuleshov, E.A. Poltoratskii, G.S. Rychkov, Diamond Relat. Mater., **20** (1), 23 (2011). DOI: 10.1016/j.diamond.2010.11.002
- [10] V.V. Dvorkin, N.N. Dzbanovsky, N.V. Suetin, E.A. Poltoratsky, G.S. Rychkov, E.A. Il'ichev, S.A. Gavrilov, Diamond Relat. Mater., **12** (12), 2208 (2003). DOI: 10.1016/S0925-9635903000320-0
- [11] G.E. McGuire, W.J. Mecouch, O. Shenderova, J. Davidson, W.P. Kang, *Back-gated diamond field tip array cathodes for 220 GHz TWT* (International Technology Center Raleigh NC, Nashville, Tennessee, 2009), p. 4–29.
- [12] X. Yuan, W. Zhu, Y. Zhang, N. Xu, Y. Yan, J. Wu, Y. Shen, J. She, S. Deng, Sci. Rep., **6** (1), 1 (2016). DOI: 10.1038/srep32936
- [13] N. Tatsumi, A. Veda, Y. Seki, Y. Nishibayashi, T. Imai, SEI Techn. Rev., **64**, 15 (2007).
- [14] Х. Мейнке, Ф.В. Гундлах, *Радиотехнический справочник* (Госэнергоиздат, М.–Л., 1962), т. II, с. 72. [H. Meinke, F.W. Gundlach, *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*, Abschnitt S: Impulstechnik (Springer, 1956).]
- [15] A.S. Tremsin, O.H.W. Siegmund, Diamond Relat. Mater., **14** (1), 48 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2004.06.039>
- [16] E. Il'ichev, V. Khaustov, A. Kuleshov, D. Migunov, P. Minakov, R. Nabiev, G. Petrukhin, G. Rychkov, E. Teverovskaya, Diamond Relat. Mater., **94**, 209 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.03.005>