

11;12

Твердотельный автоэмиссионный диод

© В.А. Беспалов, Э.А. Ильичев, А.Е. Кулешов, Д.М. Мигунов,
Р.М. Набиев, Г.Н. Петрухин, Г.С. Рычков, Ю.В. Щербахин

Национальный исследовательский университет „МИЭТ“, Москва
E-mail: edi144@mail.ru

Поступило в Редакцию 4 октября 2012 г.

Представляются результаты экспериментальных исследований характеристик твердотельных автоэмиссионных диодов, впервые полученных на основе гетероструктур кремний/алмаз, с наноструктурированной гетерограницей.

Реализация сильноточных автоэмиссионных катодов позволяет по сравнению с термоэмиссионными катодами не только значительно уменьшить габариты вакуумных приборов и устройств, но и существенно расширить частотный диапазон их эффективной работы, повысить монохроматичность энергии эмитируемых электронов и увеличить КПД приборов этого класса. Однако, вопреки усилиям многочисленных групп исследователей, получить быстродействующие автоэмиссионные катоды для сильноточных вакуумных диодов и триодов, имеющих приемлемый временной ресурс их устойчивой работы, до настоящего времени никому не удалось [1–3]. В результате сильноточные катоды для вакуумных диодов и триодов изготавливают на основе термоэмиссионных катодов.

Надежды реализовать автокатоде на основе углеродных наноструктур (УНС), выращенных плазменно-химическим осаждением из газовой фазы (PECVD — plasma enhanced chemical vapor deposition), в расчете на уникальность их электрических и механических свойств (твердость ~ 1 ТПа, прочность ~ 45 ГПа, электропроводность $\sim 12.9 \text{ k}\Omega^{-1}$ и теплопроводность $\sim 2000 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, модуль упругости ~ 1 ТПа и предел текучести ~ 2 ГПа) также не увенчались успехом. Причина тому в значительной дисперсии диаметров острий эмитирующего электроны массива нанообъектов. Последнее является следствием недопустимо большой дисперсии латеральных размеров каталитических капель — своеобразных нанореакторов УНС и основы каждого из нанообъектов массива, выращенного методом PECVD. В результате для автоэмисси-

онных узлов на основе УНС удается создать пороговые условия автоэмиссии электронов лишь для незначительной группы нанообъектов массива. Этим объясняется тот факт, что при возможности снятия с одиночной УНС тока $\sim 1 \mu\text{A}$ редко удается с площади $\sim 1 \text{mm}^2$, включающей сотни тысяч таких нанообъектов, снять токи большие 0.1mA . В результате в режиме постоянного тока в автоэммиттерах удается надежно реализовать плотности токов не более $\sim 0.1 \text{A/cm}^2$. Данный фактор, в совокупности с низким пределом текучести материала каталитических капель и является препятствием к реализации сильноточных автокатодов. Действительно, попытка подключить к группе УНС с доминирующим аспектным отношением, эмитирующей электроны, другие нанообъекты того же массива посредством увеличения разности потенциалов между катодом и анодом приводит к разрушению каталитических оснований уже эмитирующих групп.

Попытки сформировать массивы наноструктур (НС) в твердых пленках [4], хотя и позволили существенно уменьшить дисперсию диаметров их острий, но разброс значений аспектного отношения нанообъектов массива из-за значительной дисперсии их длин остается все же недопустимо высоким.

В данной работе предложены автокатоды для твердотельных автоэмиссионных диодов, нанообъекты активной поверхности которых находятся в одинаковых условиях по отношению к процессу автоэмиссии, независимо от различия их высот. Результаты иллюстрируются на примере экспериментальных исследований твердотельных диодов на основе гетероструктур кремний/алмаз, гетеропереходная граница которых реализована в виде массивов из наноструктурированных полупроводниковых объектов. На рис. 1 представлены типичные РЭМ-изображения массива полупроводниковых НС (рис. 1, *a*) и скола гетероструктуры твердотельного автоэмиссионного диода (рис. 1, *b*).

Привлекательность формирования на границе $n-p$ -гетероперехода массива из наноразмерных острий (например, наноразмерных конусов) обусловлена возможностью значительного „обострения“ электрического поля в ближайшей окрестности острий нанообъектов, что увеличивает вероятность подбарьерного транспорта носителей заряда через его металлургическую границу гетероперехода. Такой режим работы можно реализовать не только для кремниевых острий, но и для острий из ряда других полупроводников (Ge, SiC и GaAs, например). Использование в качестве коллекторного слоя твердотельного автоэмиссионного диода поликристаллической алмазной пленки, слаболегированной

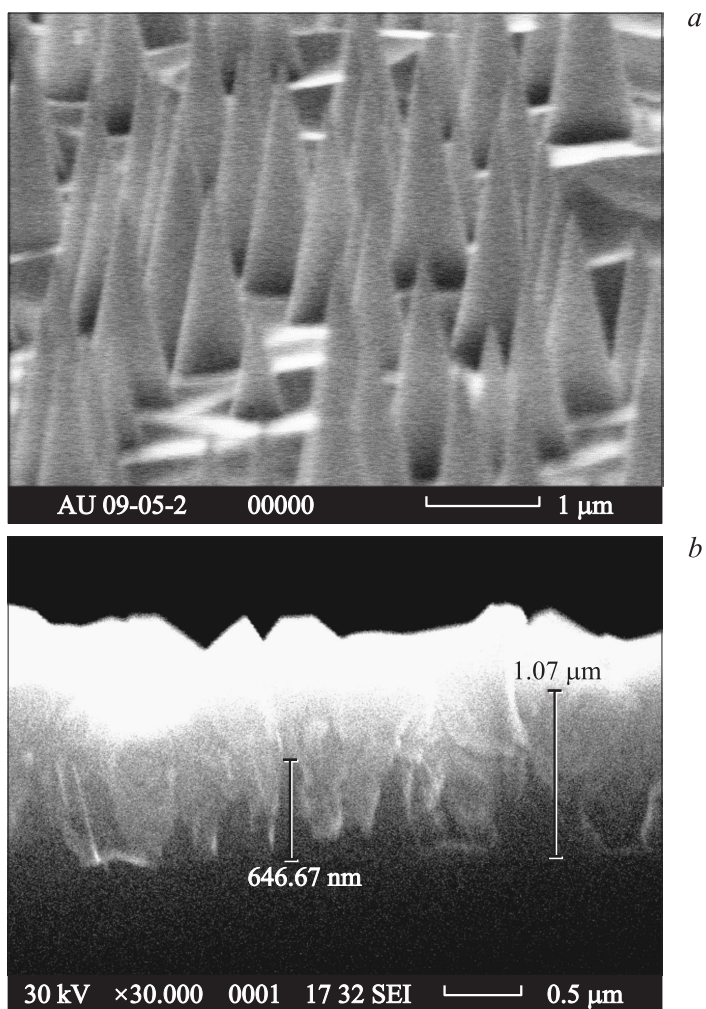


Рис. 1. РЭМ-изображение: *a* — массива полупроводниковых наноструктур, *b* — скола гетероструктуры твердотельного автоэмиссионного диода с наноструктурированной гетерограницей.

акцепторами, создает одинаковые пороговые условия для участия в автоэмиссии большого числа нанообъектов из массива наноструктур на гетерогранице.

Действительно, сравнительные исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) эмиссии электронов в вакуум из массива НС, сформированных на поверхности кремниевых подложек, и ВАХ твердотельных диодов, сформированных на основе гетероструктур кремний/алмаз с такой же плотностью НС на гетерогранице и коллекторным слоем из поликристаллического алмаза, показали, что токи твердотельных диодов превышают токи, эмитируемые с той же удельной площади массивами НС в вакуум с той же удельной площади, примерно в 1 000 раз. В частности, если при автоэмиссии из массива НС в вакуум с площади в 1 mm^2 удастся снять ток не более $50\text{--}70 \text{ }\mu\text{A}$, то с мезы твердотельного диода площадью в 1 mm^2 , на гетерогранице которого сформированы НС той же плотности, снимаемый ток достигает уже значений $\sim 50 \text{ mA}$. При этом, если пороговые поля автоэмиссии с массива нанообъектов в вакуум составляют $\sim 5\text{--}7 \text{ V}/\mu\text{m}$, то для твердотельного диода, прямая ветвь ВАХ которого имеет „фауллеровский“ характер, пороговые поля составляют $\sim 0.2 \text{ V}/\mu\text{m}$.

На рис. 2 и 3 приведены типичные ВАХ и температурные зависимости для токов в ячейках твердотельного автоэмиссионного диода. ВАХ носит диодный характер, ее прямая ветвь, начиная с напряжений $\sim 0.35 \text{ V}$, указывает на эмиссию электронов по механизму Фауллера–Нордгейма. Таким образом, можно полагать, что при напряжениях прямого смещения $p\text{--}n$ -гетероперехода $\sim 0.35 \text{ V}$ на гетерогранице Si nano/алмаз реализуются условия для эффективной автоэмиссии электронов, на что указывает „фауллеровский“ характер зависимости тока от напряжения. Обработка ВАХ прямой ветви автоэмиссионного диода с учетом размеров диаметров острий $\sim 20 \text{ nm}$ (рис. 1, *a*) позволила оценить величину барьера на гетерогранице Si nano/алмаз в $q\phi_k \approx 0.1 \text{ eV}$ и определить средние значения ($\sim 1.7 \text{ eV}$) энергии сродства к электронам для используемых нами поликристаллических алмазных пленок (получены методом PECVD). Характер ВАХ при обратном смещении (минус на металле) дает основания полагать, что обратный ток контролируется глубокими энергетическими центрами объема поликристаллической алмазной пленки. Действительно, до напряжений обратного смещения $\sim 5 \text{ V}$ зависимость тока от напряжения является сублинейной. При напряжении обратного смещения, превышающем величину $\sim 5 \text{ V}$, зависимость тока от напряжения переходит

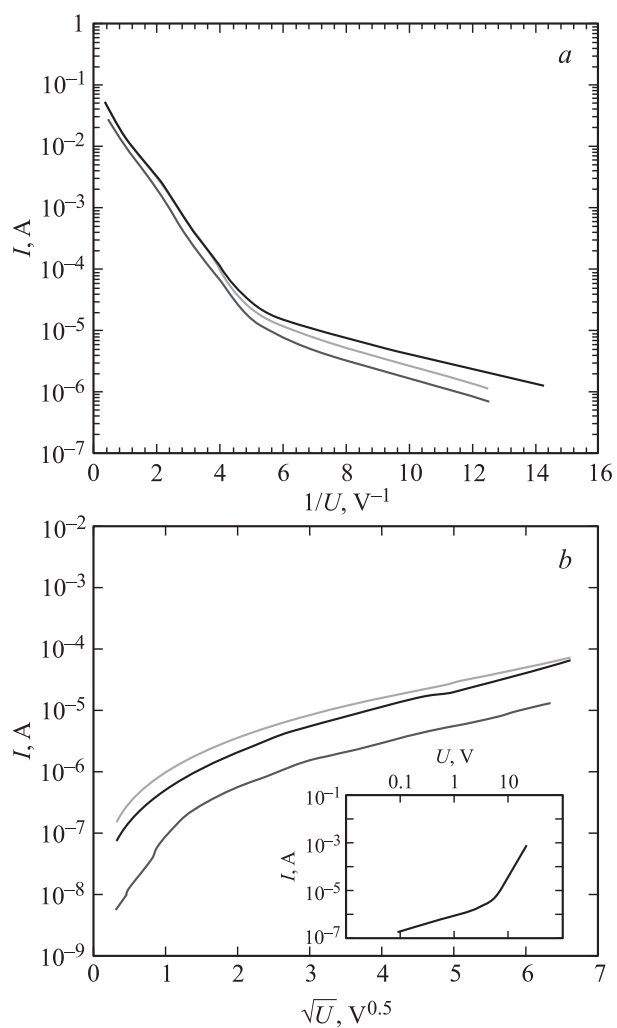


Рис. 2. Типичные ВАХ твердотельных автоэмиссионных диодов: *a* — при прямом смещении, *b* — при обратном смещении.

в сверхлинейную, которую до напряжений ~ 8 V можно аппроксимировать степенной зависимостью с показателем степени ~ 3 . Попыт-

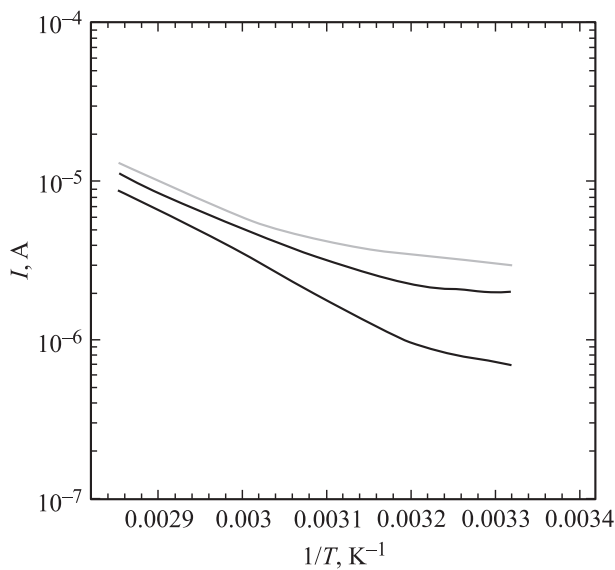


Рис. 3. Типичные температурные зависимости тока автоэмиссионных диодов.

ки оценить возможность ограничения тока барьерными механизмами позволили для полевого фактора зависимости тока от напряжения обратного смещения ($q\beta_{sh}$) получить величину $\sim 10^{-3} \text{ eV} \cdot \text{cm}^{0.5} \cdot \text{V}^{-0.5}$, что \sim в 5 раз превышает полевой фактор барьерного ограничения ловушками объема (эффект Пула–Френкеля) для алмазной пленки (диэлектрическая проницаемость ~ 6).

Учет энергии активации (0.43 eV), определенной из температурных зависимостей тока при обратном смещении гетеропереходного диода (рис. 2, b), позволяет получить для барьеров, ограничивающих ток при обратном смещении, значение $\sim 0.59 \text{ eV}$. Значительное несоответствие энергии барьеров, контролирурующих ток при обратном смещении гетеродиода (0.59 eV) и разницы (2.9 eV) между работой выхода из металла и определенной выше энергией электронного сродства электронов ($\sim 1.7 \text{ eV}$) для поликристаллической алмазной пленки, дает возможность предположить, что ток при обратном смещении контролируется не барьером на границе раздела металл/алмаз, а глубокими энергетическими центрами объема поликристаллического алмазного слоя, связанными с барьерами между кристаллитами. При

этом следует допустить, что фиксация уровня Ферми на границе раздела металл/поликристаллический алмаз происходит на уровне ~ 0.59 eV ниже дна зоны проводимости алмаза, что вызывает значительную деформацию зонной диаграммы алмаза вблизи границы раздела металл/алмаз и приводит к росту токов утечки до величин ($\sim 10 \mu\text{A}$), существенно больших априори ожидаемых.

Разработка предлагаемого нового класса стойких к высоким температурам и радиации быстродействующих сильноточных твердотельных автоэмиссионных диодов, работа которых базируется на эффекте холодной эмиссии электронов, а сами конструкции не нуждаются в вакуумировании, востребована в радиочастотных и импульсных схемах и многочисленных устройствах терагерцового диапазона частот.

Что касается эмиссии электронов из обсуждаемой гетеропереходной среды pnpSi /алмаз в вакуум, то ожидание положительного эффекта здесь обусловлено как указанным выше фактором оптимизации пороговых условий для автоэмиссии, так и дополнительной возможностью использования внутреннего усиления потока эмитируемых электронов за счет „умножения“ числа электронов в сильном электрическом поле поликристаллического алмазного слоя. Учитывая, что некоторым граням кристаллитов поликристаллического алмаза свойственна отрицательная энергия сродства к электрону, можно ожидать, что выход вторичных электронов в вакуум из пленки поликристаллического алмаза реализуется без существенных потерь. Кроме того, с целью компенсации потерь, связанных с малой диффузионной длиной электронов в реальных пленках поликристаллического алмаза, предпочтительнее пленки для коллектора изготавливать в виде сетки, с линейными размерами ячеек приблизительно диффузионной длины.

Актуальность разработки сильноточных вакуумных автоэмиссионных катодов подтверждается громадным, до сих пор неудовлетворенным спросом на них со стороны СВЧ-устройств и приборов вакуумной силовой электроники.

Список литературы

- [1] *Vikulov N., Kichaeva N.* // Electronica: NTB. 2008. N 5. P. 70.
- [2] *Ha J.K., Chung B.H., Han S.Y. et al.* // L. Vac. Sci. Technol. 2002. V. 20. P. 2080.
- [3] *de Jonge N., Bonard J.M.* // Philos. Trans. R. Soc. Lond. A. 2004. V. 362. P. 2239.
- [4] *Ильичев Э.А., Инкин В.Н., Мигунов Д.М., Петрухин Г.Н., Полторацкий Э.А., Рычков Г.С., Шкодин Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 4. С. 48–52.