

VACUUM MICROELECTRONICS

D. I. TRUBETSKOV

What are the sources and peculiarities of the new scientific trend in physical electronics? Why has autoelectronic emission so much significance for VME? How to make devices and components with microdimensions (with nanometric tolerance for these dimensions)? What is VME for? This paper contains the answers to the questions put forward.

Каковы истоки и особенности нового научного направления в физической электронике? Почему автоэлектронная эмиссия столь важна в ВМЭ? Как сделать приборы и компоненты, имеющие микронные геометрические размеры (с нанометрическими допусками на эти размеры)? Зачем нужна ВМЭ? Ответы на поставленные вопросы и дает данная статья.

© Трубецков Д.И., 1997

ВАКУУМНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

Д. И. ТРУБЕЦКОВ

Саратовский государственный университет

О ТРУДНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Леонид Исаакович Мандельштам сравнивал определение с колючей проволокой. В своих знаменитых лекциях [1] он писал: “Планк как-то сказал, что правильная классификация – это уже высокий вид познания”. Перефразируя Мандельштама, заметим: совсем нелегко дать определение вакуумной микроэлектроники. И все же начнем с определения, заручившись авторитетом А. Броди и К.А. Спиндта, признанных специалистов в этой новой области знаний. В вольном переводе определение из их монографического обзора звучит следующим образом. Термин “вакуумная микроэлектроника” используется для описания приборов или компонентов, имеющих микронные геометрические размеры (с нанометрическими допусками на эти размеры), принцип действия которых основан на движении свободных электронов в вакууме согласно законам классической физики. Выделяются три ключевых аспекта вакуумной микроэлектроники:

1) необходимо “вырвать” электроны из металла (или полупроводника), в котором они находятся, и инжектировать их в вакуум в достаточном количестве и с малым разбросом по энергиям для последующего использования в конструируемом приборе;

2) необходимо изготовить структуры нужных размеров и допусков, включая нанесение тонких слоев материалов с такими физическими свойствами, какие пригодны для приборов;

3) необходимо разработать прибор так, чтобы он был устойчив по отношению к нежелательным разрядам в вакууме и к изменениям окружающей среды.

Написанное выше трудно назвать определением. Скорее это круг вопросов, которыми занимается новая наука. Вакуумная микроэлектроника действительно нова и молода. По-видимому, официальной датой ее рождения следует считать 1988 год, когда в Вильямсбурге (США) состоялась I Международная конференция по вакуумной микроэлектронике. Начиная с того времени число публикаций в области вакуумной микроэлектроники растет экспоненциально, а может быть, и быстрее – по законам взрывной неустойчивости. С 1988 года международные конференции проходят каждый год в разных странах мира.

“Обратно в будущее” – под таким символическим девизом прошла первая конференция в Вильямсбурге. По своей сути этот девиз сохранился и на последующих конференциях, хотя восторженность уступила

место сдержанному оптимизму. Организаторы конференций подчеркивают, что, по их мнению, открылась новая эра миниатюрных вакуумных электронных приборов и вакуумных интегральных схем с автоэлектронной эмиссией (в некоторых случаях речь идет и о микровакуумных приборах и интегральных схемах на основе термоэлектронных катодов). Эти новые приборы обладают сверхвысоким быстродействием (субпикосекундным), высокой устойчивостью к радиации, слабой чувствительностью к температуре и весьма большим коэффициентом полезного действия (КПД). Приборы вакуумной микроэлектроники могут быть использованы как усилители и генераторы миллиметрового диапазона длин волн, в системах непосредственного телевизионного вещания со спутников с использованием тридцатисантиметровых антенн и менее, в радиолокационных станциях, телефонных системах сотовой связи и т.д. Особо перспективным представляется использование этих приборов для создания нового поколения сверхбыстрых компьютеров. В этом случае элемент памяти может быть создан из двух ламп по системе триггера. При токе с одного острия 10^{-5} А мощность, рассеиваемая парой микротриодов при напряжении на аноде 20 В, будет $2 \cdot 10^{-4}$ Вт. При плотной упаковке на 1 см^2 площади можно разместить около 10^6 элементов памяти, для которых мощность рассеяния составляет 20 Вт/см², так что в качестве основной выступает здесь проблема теплоотвода. В 1988 году на 1 см^2 размещали 10^4 микротриодов, так что мощность рассеяния составляла уже 2 Вт.

Интересным бытовым применением вакуумной микроэлектроники представляется разработка плоских панельных дисплеев, обеспечивающих изображение высокого качества и высокой яркости (в том числе и для цветного телевидения). Много внимания уделяется созданию электронных пушек с автоэмиссионными катодами и ионных источников, вопросам сканирующей туннельной микроскопии и др. Перспективы кажутся фантастическими и заманчивыми, а диапазон исследований непрерывно расширяется.

Обсудим далее физику, принцип действия и особенности конструкций некоторых приборов вакуумной микроэлектроники.

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ – ГЛАВНОЕ В ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ. ЗАКОН ФАУЛера–НОРДГЕЙМА

Автоэлектронная эмиссия – физическое явление, состоящее в том, что электроны покидают металл или полупроводник, в котором они находятся в качестве свободных носителей заряда, под действием сильного электрического поля, приложенного к поверхности. В случае автоэлектронной эмиссии электроны преодолевают потенциальный барьер на границе тела не за счет кинетической энергии их беспорядочного теплового движения, как при тер-

моэлектронной эмиссии, а путем специфического квантового явления – туннельного эффекта (см. [2]).

В простейшем случае туннельный эффект состоит в том, что микроскопическая частица, первоначально находившаяся по одну сторону потенциального барьера (то есть области пространства, для которой полная энергия E частицы не превышает ее потенциальной энергии $U(x)$), может с конечной вероятностью проникнуть через барьер и быть обнаружена по другую его сторону.

Туннельный эффект – явление принципиально квантовое, не имеющее аналогов в классической механике. Согласно механике Ньютона, частица с массой m не может находиться внутри потенциального барьера, поскольку из уравнения полной энергии

$$E = \frac{p^2}{2m} + U(x) \quad (1)$$

следует, что соотношение $E < U(x)$ выполняется только для мнимых значений импульса p . Объяснение туннельного эффекта связано с соотношением неопределенностей Гейзенберга, согласно которому квантовая частица не может находиться в состоянии с одновременно точно определенными координатой x и импульсом p . Неопределенности Δx и Δp всегда удовлетворяют соотношению

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar, \quad (2)$$

$\hbar = 1,05459 \cdot 10^{-27}$ эрг · с – постоянная Планка. Согласно этому принципу, слагаемые в правой части уравнения (1) не имеют одновременно определенных значений и могут отличаться от своих средних. Поэтому имеется конечная вероятность обнаружить квантовую частицу в запрещенной с точки зрения классической механики области. Заметим, что неким аналогом туннельного эффекта в волновой оптике может служить “просачивание” световой волны внутрь отражающей среды в условиях полного внутреннего отражения.

В 1928 году Г.А. Гамов с помощью туннельного эффекта объяснил явление α -радиоактивности тяжелых ядер. В своей замечательной “Неформальной автобиографии” [3]¹ Гамов так описывает это явление:

«Это было типичное явление, которое было бы невозможно в классической ньютоновской механике, но фактически ожидалось в новой волновой механике. В волновой механике нет непроницаемых барьеров, и, как это выразил британский физик Р.Г. Фаулер после моей лекции в Лондонском Королевском обществе той

¹ Учителям интересно и полезно прочитать книгу Георгия Антоновича (Джорджа) Гамова – ученого, внесшего существенный вклад в развитие мировой науки. В ядерной физике это главным образом теория α -распада, в космологии – теория Большого Взрыва и почти точный расчет реликтового излучения, в биофизике – первый принцип расшифровки генетического кода ДНК.

же зимой, “каждый присутствующий в этом помещении имеет конечную вероятность покинуть его, не проходя через дверь или, конечно, не прыгая в окно”.

Движение материальных частиц управляется так называемыми волновыми пакетами, впервые предложенными Луи де Бройлем. Эти волны, распространяющиеся свободно в пространстве, где материальные частицы также могут двигаться без особого труда, медленно “просачиваются” через области, в которые, согласно ньютоновской механике, эти частицы вовсе не могут проникнуть. И если волна де Бройля проходит, даже и с некоторым трудом, она всегда протащит с собой частицу».

Именно Фаулер вместе с Нордгеймом в том же 1928 году построили теорию холодной эмиссии (автоэлектронной эмиссии) с поверхности металлов. На рис. 1 приведен график потенциальной энергии электрона вблизи границы металл–вакуум при отсутствии внешнего поля и при наличии слабого и сильного внешних полей в зависимости от расстояния от поверхности металла. По мере увеличения приложенного внешнего ускоряющего поля понижается высота потенциального барьера и уменьшается его ширина. Следовательно, увеличивается вероятность проникновения через барьер электронов, подлетающих к нему со стороны металла. Иными словами, увеличивается число электронов, проходящих через барьер, то есть возникает ток автоэмиссии. При этом в случае автоэмиссии с поверхности металла электрическое поле не проникает в глубь его и не влияет на движение электронов в металле. Роль внешнего поля сводится к изменению формы потенциального барьера, уменьшению его высоты и ширины.

Характеристикой одномерного туннельного эффекта является так называемый коэффициент прозрачности D потенциального барьера. Он равен от-

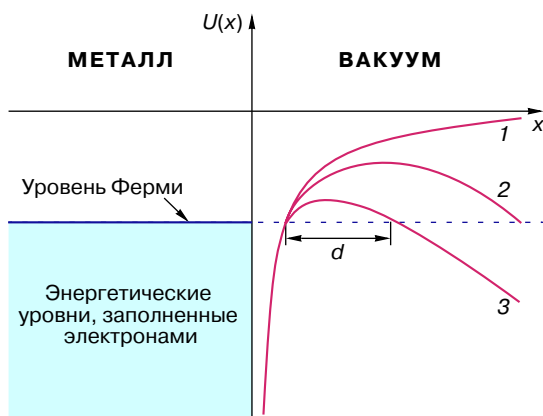


Рис. 1. Поверхностный потенциальный барьер на границе раздела металл–вакуум. Цифры 1, 2, 3 соответствуют отсутствию внешнего поля, слабому полю и сильному полю; d — ширина барьера

ношению потока прошедших через барьер частиц к падающему на барьер потоку. В частности, для прямоугольного барьера высотой U_0 и с конечной протяженностью Δ

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{2}{\hbar} \sqrt{(U_0 - E)2m} \cdot \Delta\right). \quad (3)$$

Вероятность прохождения не слишком мала, если показатель экспоненты не превышает по модулю единицы. Оценим D , подставив в формулу (3) величины ядерных масштабов. Пусть $\Delta \sim 10^{-13}$ см, $m \sim 10^{-23}$ г (масса нуклона), $U_0 - E \sim 10$ МэВ = 10^{-5} эрг, тогда $D \sim e^{-1}$. Частица в этом случае с заметной вероятностью пройдет через барьер, высота которого превышает ее энергию на 5–10 МэВ. Если $\Delta \sim 1$ см, то $D \sim 10^{-13}$, то есть вероятность проникновения частицы через барьер ничтожно мала. В области макроскопических масштабов туннельный эффект отсутствует.

Классическая теория эмиссии электронов с поверхности металла основана на предположении, что электроны в зоне проводимости ведут себя как свободные частицы, чье движение в объеме металла ограничено только силами двойного электрического слоя на границе металл–вакуум. Существование этого слоя приводит к скачку потенциальной энергии, в результате чего электрон отражается от границы, если его энергия недостаточна для преодоления барьера. При наличии внешнего электрического поля с напряженностью E потенциальный барьер снижается по величине, приобретает конечную ширину и становится возможным туннелирование электронов. В рамках этой модели плотность тока автоэмиссии выражается зависимостью

$$J = AF^2 \exp\left(-\frac{B\phi^{3/2}}{F}\right), \quad (4)$$

где ϕ — работа выхода, измеряемая в электрон-вольтах, F измеряется в В · мкм⁻¹, а J — в А · мкм⁻²; функции A и B зависят от геометрии системы и работы выхода. Это и есть знаменитая формула Фаулера–Нордгейма, которая является основной в теории автоэлектронной эмиссии. Экспериментальная проверка формулы Фаулера–Нордгейма показала, что она правильно количественно описывает зависимость тока автоэмиссии от напряженности поля, температуры и работы выхода.

Если построить график зависимости $\ln(J/F^2)$ от $1/F$, то получится прямая линия, которая носит название графика Фаулера–Нордгейма. Наклон линии позволяет определить значение работы выхода из соответствующей кристаллографической плоскости металла, что требует, однако, тщательного измерения напряженности поля на поверхности металла. Такое измерение представляет значительные трудности, поскольку эмиттирующая поверхность имеет, как правило, форму острия или лезвия. Поясним последнее.

Для получения автоэмиссионного тока с поверхности катода требуется создать напряженность поля $3-5 \cdot 10^7 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$. Для типичного значения работы выхода $\phi = 4,5 \text{ эВ}$ при этом достигается плотность тока порядка $10^7 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Предельные значения плотности тока могут достигать $10^{10} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Очевидно, что такие значительные поля невозможно создать из-за пробоя (даже в очень высоком вакууме), если область однородного поля будет превышать площадь, большую нескольких квадратных микрон. Именно поэтому автоэлектронная эмиссия реализуется только на катодах в форме острия или лезвия. Подобные катоды весьма привлекательны: они обладают чрезвычайно большой плотностью тока, не требуют подогрева, практически безынерционны. Для применения устройств с автоэлектронной эмиссией в качестве элементов радиотехнических схем весьма важно, что вольт-амперная характеристика автокатода сильно нелинейна.

**КАТОД СПИНДТА.
МАТРИЦЫ АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ.
ТРИОДЫ ВОЗВРАЩАЮТСЯ?**

Мы уже указывали, что научный мир узнал об успехах и перспективах автоэмиссионной вакуумной микроэлектроники сравнительно недавно, после I Международной конференции в 1988 году. Однако пути к преодолению тех трудностей, которые препятствовали практическому использованию автоэмиссионных процессов и о которых говорилось в начале статьи, были намечены еще в начале 70-х годов, когда Спиндтом и его сотрудниками была разработана технология изготовления матричного автоэмиссионного катода и проведено всестороннее исследование его свойств (первое сообщение о катоде Спиндта относится к 1973 году, подробная статья вышла 1976 году). Тонкопленочный катод с автоэмиссией (ТКА) представляет собой сандвич проводник—изолятор—проводник (рис. 2). Верхний проводник является сеточной пленкой с отверстием диаметра 1–3 мкм, сквозь которое протравлена полость в изоляторе до нижнего проводника (подложки). На подложке находится металлический конус (эмиттер), и его вершина располагается в отверстии сеточной пленки. Размеры этой конструкции очень малы и составляют единицы микрон. Это позволяет “убить двух зайцев” сразу: обеспечить высокие значения напряженности поля при небольших приложенных напряжениях (20–400 В) и существенно снизить требования к давлению, поскольку даже для сравнительно плохого вакуума расстояния между электродами оказываются меньше длины свободного пробега.

Спиндтом были получены катоды в виде двумерных решеток с 1, 100 и 5000 эмиттерами. В 100-конусной решетке (матрица 10×10) расстояние между эмиттерами составляло 25,4 мкм, так что полная область эмиссии представляла собой квадрат со стороной 0,25 мм. Решетка с 5000 эмитте-

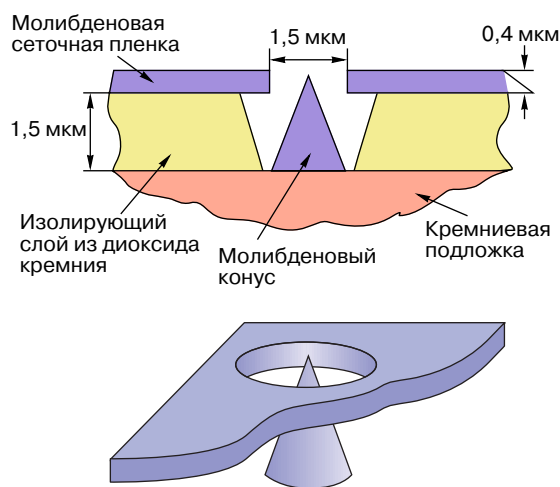


Рис. 2. Схематическое изображение тонкопленочного автоэмиссионного катода Спиндта

ров заполняла круглую область диаметром 1 мм с расстоянием между конусами 12,7 мкм. Таким образом, плотность упаковки эмиттеров достигала $6,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Рабочие напряжения находились в области от 100 до 300 В. Катоды работали при давлении 10^{-9} мм рт. ст., которое обеспечивалось непрерывной откачкой. Ток эмиссии с одного острия находился в пределах от 50 до 150 мкА, что соответствует средней плотности тока с катода $8 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$. Для катода с 5000 острий в импульсном режиме был получен ток до 100 мА (плотность тока достигала $12 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$). Разумеется, сейчас эти результаты уже не уникальны. Так, на VI Международной конференции (США) сообщалось о создании решетчатых катодов с расстоянием между эмиттерами 0,32 мкм, радиусом острия около 25 Å и диаметром отверстия в управляющем электроде 0,16 мкм. Маска для травления отверстий в структуре металл—изолятор с диаметром 0,16 мкм делается с использованием методов лазерной голографии. Созданы катоды с 9000 острий, расположенных в решетке размером 30×30 мкм, и 800 остриями в решетке размером 9×9 мкм. Рабочее напряжение на управляющем электроде было около 30 В, на аноде (в схеме триода) — 200 В. Расстояние между управляющим электродом и удаленным анодом порядка 100 мкм. Катод со 100 остриями в рабочем режиме дает ток около 0,1 мА, что соответствует средней плотности тока $120 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$.

Если к спиндтовскому катоду добавить сверху еще один электрод, к которому приложено положительное напряжение, то получим самый обычный вакуумный триод, отличающийся только весьма малыми размерами. Оценки показывают, что рабочая частота вакуумных приборов может быть повышена по крайней мере на порядок по сравнению с полупроводниковыми.

Важнейшим преимуществом вакуумных микротриодов перед полупроводниковыми является их

радиационная и термическая стойкость, что открывает такие сферы использования, как космическая и военная техника, контроль ядерных реакторов, реакторы расщепления и синтеза, контроль ракетных двигателей, управление геотермальными скважинами и т.п.

Именно это привело, по-видимому, к появлению статей с утвердительными заголовками вроде “Триоды возвращаются”. К сожалению, вакуумный микротриод имеет и врожденные недостатки, причины которых связаны с его конструктивными особенностями, и главный из них – малый коэффициент усиления.

Помимо катодов в виде металлических острий, полученных в результате напыления, многие научные группы занимаются созданием и изучением катодов из полупроводниковых материалов, таких, как кремний. По мнению одного из авторитетных исследователей в вакуумной микроэлектронике, Г. Грея, решетки автоэмиссионных катодов, изготовленных из монокристаллов кремния, обладают следующими свойствами: имеют большую крутизну, плотность тока и низкую межэлектродную емкость катод–сетка, что важно в сверхвысокочастотном диапазоне длин волн (особенно на миллиметровых волнах); обеспечивают высокую плотность тока для использования в электронно–лучевых трубках; имеют высокую яркость и малый размер источника для использования в сканирующих микроскопах; плоские дисплеи, созданные на их основе, имеют большие размеры экрана и низкую стоимость.

Кремний – очень удобный материал для изготовления автоэмиссионных катодов. Его работа выхода 4,2 эВ сравнима с работой выхода электронов из металлов, его механические, электрические и химические свойства хорошо изучены, технология работы с кремнием тщательно отработана при разработке сверхбольших интегральных схем, устройства на кремниевых полевых эмиттерах могут быть легко интегрированы в микросхемы. Кроме того, разработаны методы изготовления острий из кремния с радиусом кривизны атомных размеров (меньше 10 \AA), что позволяет существенно понизить рабочее напряжение. Изготовлены решетки из 10×10 и 80×80 острий с расстоянием между остриями 4 мкм (плотность упаковки $6,25 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$) и диаметром отверстий в управляющем электроде 2 и 3 мкм. Для отверстий с диаметром 2 мкм ток эмиссии 1 мА достигался при напряжении 66 В на управляющем электроде. Максимальный ток, снимаемый с одного острия, мог достигать 50 мА. Пожалуй, самое замечательное свойство кремниевых катодов в том, что форма образующегося острия, его радиус скругления и высота практически идентичны для всех элементов решетки. Однако автоэмиссионные катоды из кремния имеют более низкую плотность тока, чем металлические катоды. Ситуацию можно исправить покрывая кремниевые эмиттеры тонким слоем металла, в

качестве которого можно использовать вольфрам, титан, тантал, платину, палладий и золото.

До сих пор речь шла об автоэмиссионных катодах с вертикально расположенными остриями. Между тем еще в середине 60-х годов была высказана и практически реализована идея создания микровакуумных диода и триода, в которых автоэмиссия имела место с края катода в виде тонкой металлической пленки, напыленной на диэлектрической подложке. Толщина эмиттирующей пленки составляла $100\text{--}200 \text{ \AA}$, расстояние катод–анод было 6–8 мкм, расстояние катод – управляющий электрод – около 0,5 мкм. При напряжении на аноде 300 В ток менялся от $1 \cdot 10^{-3}$ до 3 мкА при изменении потенциала управляющего электрода от 175 до 250 В.

Автоэмиссионные триоды (транзисторы) с горизонтальной геометрией рассматриваются как основные кандидаты для работы на сверхвысоких частотах, поскольку такие конструкции имеют низкую емкость между катодом и управляющим электродом. Уже создан и микровакуумный аналог тетрода: между управляющим электродом и анодом введен дополнительный четвертый электрод.

Следует заметить, что поиск новых материалов, подходящих для создания автокатодов, ведется непрерывно. Недавно обнаружили, что одним из таких материалов является алмаз. Его уникальность состоит в том, что возможна автоэмиссия электронов при низких напряженностях электрического поля – менее $1 \text{ В} \cdot \text{мкм}^{-1}$.

Для многих приложений, например для использования в плоских дисплеях или для создания источников электронов в мощных СВЧ-приборах, нет необходимости, чтобы катод имел регулярную структуру в виде периодических острий. Поэтому особый интерес вызывает исследование автоэлектронной эмиссии из тонких пленок аморфного алмаза. В экспериментах получена плотность тока в пределах $0,1\text{--}1 \text{ мА} \cdot \text{мкм}^{-2}$ при полях с напряженностью $20\text{--}40 \text{ В} \cdot \text{мкм}^{-1}$. Такие плотности тока достаточны для использования в плоских дисплеях.

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С АВТОЭМИССИОННЫМИ КАТОДАМИ – НАИБОЛЕЕ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ПРИБОР ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Распределенный усилитель (РУ) был предложен в 1936 году, а реализован в 1948 году. Этот усилитель представляет собой набор одинаковых триодов, у которых все сетки присоединены к одной, а аноды к другой двухпроводным длинным линиям. Волна, возбужденная входным сигналом в сеточной линии, модулирует анодные токи триодов, каждый из которых возбуждает в анодной (выходной) линии волны, распространяющиеся влево и вправо. При идеальном согласовании линий и их идентичности все правые волны сложатся в фазе, а левые – в противофазе, так что в анодной линии останется одна выходная волна и амплитуда напряжения в этой

линии будет пропорциональна числу ламп. Достоинством такого РУ является ровная частотная характеристика, простирающаяся от килогерц до сотен мегагерц.

Идея РУ была совершенно забыта вплоть до последнего времени, когда оказалось, что эта схема практически безо всяких изменений может быть использована вакуумной микроэлектроникой, только место вакуумных триодов занимает решетка из микротриодов, а сеточная и анодная линии представляют собой микрополосковые линии, образованные катодной, сеточной и анодной пленками.

Несмотря на простоту подобной схемы, ее реализация оказалась достаточно затрудненной вследствие тех недостатков микротриодов, о которых говорилось в предыдущем разделе. Наверное, из-за этого первым работающим устройством такого типа оказался усилитель, созданный Греем и его сотрудниками в Naval Research Laboratory в Вашингтоне, конструкция которого несколько отличается от описанной выше, хотя принципиальная схема осталась такой же. В отличие от пространственного расположения волноведущих линий друг над другом у Грея эти линии расположены в одной плоскости, совпадающей с плоскостью катода (рис. 3), и образованы меандром, играющим роль сетки, и двумя гребенками — соответственно анодной и катодной, на последнюю нанесены решетки из эмиттеров в виде пирамид. В отличие от спиндтовских греевские катоды выполнены из кремния с использованием более традиционных твердотельных методов, включая электронно-лучевую литографию и направленное травление.

ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП. О НЕКОТОРЫХ ПРИМЕНЕНИЯХ ВАКУУМНОЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Одним из выдающихся достижений в физике последних пятнадцати лет было создание в 1981 году сотрудниками исследовательской лаборатории фирмы ИВМ в Цюрихе Гердом Биннингом и Генрихом Рорером уникального физического прибора — сканирующего туннельного микроскопа (СТМ). Это событие оказало столь быстрое и серьезное воздействие на развитие физики, что уже в 1986 году авторам СТМ была присуждена Нобелевская премия.

Работа СТМ основана на эффекте туннелирования электронов сквозь узкий потенциальный барьер между металлической поверхностью и зондом, которым служит твердое острие. Толщина диэлектрика определяет ширину потенциального барьера, в то время как его высота и форма определяются величинами работы выхода Φ_1 и Φ_2 и разностью потенциалов V между металлами. В СТМ (рис. 4) один из металлов заменяется металлическим острием, которое закрепляется на x, y, z -позиционере (в месте жесткого соединения трех пьезодвигателей). Острие подводится к образцу с помощью грубого позиционера до получения туннельного тока. Это происхо-

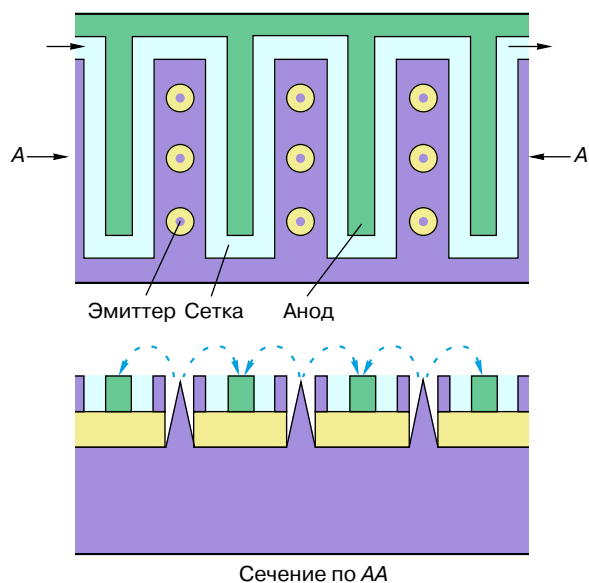


Рис. 3. Схематическое изображение распределенного усилителя Грея

дит при расстоянии $S \sim 10 \text{ \AA}$ (в этом случае волновые функции электронов ближайших друг к другу атомов острия и образца перекрываются). При разности потенциалов $V \ll \Phi \approx \frac{1}{2}(\Phi_1 + \Phi_2)$ плотность туннельного тока j определяется формулой

$$j \approx \frac{k_0 V}{4\pi^2 S} e^{-2k_0 S},$$

где S — эффективное туннельное расстояние в \AA , k_0 — постоянная затухания плотности волновых функций в туннельном зазоре, $k_0 = [2m\Phi/h^2]^{1/2}$; для типичных величин $\Phi \sim 4,5 \text{ эВ}$ значение $k_0 \sim 1,1 \text{ \AA}^{-1}$. Характерная величина туннельного тока составляет 10^{-9} А при $V \sim 0,01 \text{ В}$ и $S \sim 10 \text{ \AA}$. Из приведенной формулы следует, что при изменении расстояния на 1 \AA величина туннельного тока изменяется на порядок.

Для сканирования исследуемой поверхности применяются так называемые пьезоэлектрические манипуляторы. Изменяя напряжение на тонких металлических электродах, приложенных к пластинке из пьезокерамики, на $0,1 \text{ В}$ можно удлинить стержень на $0,1 \text{ нм}$, то есть на величину порядка поперечника атома. Три стержня-манипулятора, соединенные, как показано на рис. 4, позволяют передвигать зонд, расположенный в месте их соединения, в пространстве координат смещения зонда x, y, z с помощью управляющих напряжений U_x, U_y и U_z . Подобно лучу на экране телевизора, напряжения U_x и U_y перемещают зонд по поверхности исследуемого объекта, сканируя поверхность по параллельным строкам, отстоящим друг от друга на заданное расстояние. Напряжение U_z двигает зонд вверх и вниз. Если поддерживать напряжение U_z неизменным, то при сканировании поверхность

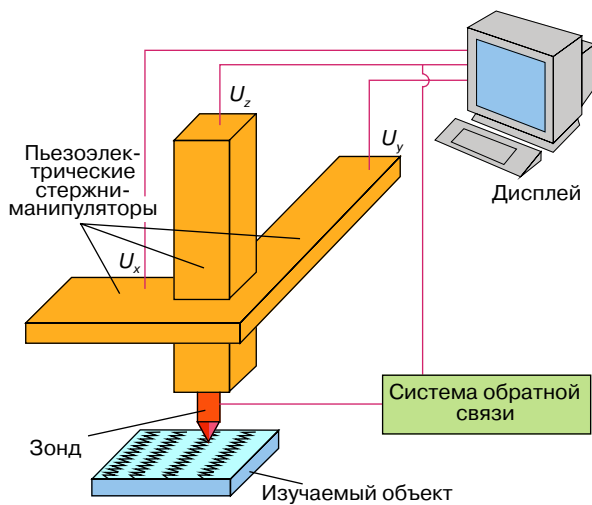


Рис. 4. Схематическое устройство СТМ

объекта из-за неровностей будет то удаляться, то приближаться к зонду, так что при больших неровностях зонд может даже столкнуться с ними. Для того чтобы этого не произошло, в устройство вводят обратную связь в виде сложной и высокочувствительной электронной схемы, заставляющей зонд смещаться вверх и вниз в соответствии с рельефом поверхности. Элемент обратной связи реагирует на изменения туннельного тока и изменяет напряжение U_z на вертикальном пьезоэлектрическом манипуляторе. Последний перемещает зонд так, что туннельный ток остается практически постоянным, что возможно лишь при сохранении неизменным расстояния между зондом и поверхностью (величину S можно поддерживать постоянной с точностью до $0,01 \text{ \AA}$). Таким образом, острое движется по поверхности, а напряжение U_z , пропорциональное высоте места поверхности, над которым в данный момент находится острое, служит удобной мерой рельефа.

Получаемая таким образом информация о рельефе исследуемой поверхности вводится в память ЭВМ и после фильтрации шумовых и паразитных сигналов выводится на дисплей в виде полутоновой «топографической карты» поверхности (высота рельефа отражается интенсивностью раскраски). СТМ имеет увеличение 10^8 , что позволяет исследовать поверхности кристаллических и полимерных материалов с атомным разрешением. Важность СТМ для вакуумной микроэлектроники очевидна — без него не разглядеть то, что создается.

Выше уже указывалось, что катоды с полевой эмиссией могут быть использованы для создания плоских дисплеев, которые, в свою очередь, можно применять как информационные транспаранты, дисплеи для портативных компьютеров и в качестве телевизионных трубок. Цветное изображение на экране, покрытом люминофором (обычно это ZnO), формируется с помощью так называемых пикселей.

Каждый пиксел имеет форму квадрата со стороной 250 мкм , так что на одном квадратном миллиметре помещается 16 элементов. Источниками электронов являются решетки полевых эмиттеров лезвийной формы с плотностью 10^6 эмиттеров $\cdot \text{см}^{-2}$. На пиксел приходится три управляющих электрода, выполненных в виде полос шириной 40 мкм , по одному на красный, зеленый и голубой цвета. Люминофор соответствующего цвета нанесен на стеклянную пластину над каждым из электродов. Подавая различные напряжения на электроды, можно независимо менять интенсивность основных цветов, создавая полную цветовую гамму. Интерес к дисплеям с полевой эмиссией резко возрос после того, как специалистами из исследовательской лаборатории LETI (Гренобль, Франция) были продемонстрированы действующие монохромные и цветные дисплеи с размером 15 см по диагонали для телевидения и мониторов компьютеров. Основные достоинства таких дисплеев — высокая яркость изображения, низкие рабочие напряжения, быстрый отклик (менее 1 мкс).

Еще одной областью использования автоэмиссионных катодов является создание микросенсоров, которые могут работать как датчики давления, акселерометры, измерители перемещений, элементы микрофонов. В микросенсоре коллектор решетки автокатодов представляет собой упругую проводящую пластину, смещение которой зависит от внешнего давления. Поскольку напряженность поля на острие зависит от расстояния до коллектора, смещение последнего будет изменять ток эмиссии. Известны экспериментальные данные для микросенсора с полевыми автокатадами, изготовленными из кремния. В режиме постоянного тока (при изменении прогиба изменяется напряжение, чтобы не менялся ток) при общем токе 1 мкА измеренная чувствительность составляла $6,6 \text{ В} \cdot \text{мкм}^{-1}$. В режиме постоянного напряжения (при смещении пластины регистрируется изменение тока) при изменении смещения от $0,3$ до $2,0 \text{ мм}$ ток изменялся на два порядка (рабочее напряжение было 4000 В).

ЛИТЕРАТУРА

1. Манделъштам Л.И. Лекции по теории колебаний. М.: Наука, 1972.
2. Коржув А.В. // Физика в школе. 1995. № 3. С. 66.
3. Гамов Г.А. Моя мировая линия: Неформальная автобиография. М.: Наука, 1994.

* * *

Дмитрий Иванович Трубецков, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент Российской Академии наук, зав. кафедрой электроники и волновых процессов, ректор Саратовского государственного университета. Область научных интересов: сверхвысокочастотная электроника, теория колебаний и волн, применение методов нелинейной динамики в различных областях науки, история науки. Автор и соавтор 13 монографий и учебных пособий, более 200 научных работ.