



ВАКУУМНАЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА - БРЕМЯ ОЖИДАНИЙ

Д.И. Трубецков, А.Г. Рожнев, Д.В. Соколов

Статья представляет собой популярное введение в новое направление современной электроники - в вакуумную микроэлектронику. Содержит исторический обзор, краткое изложение теории автоэлектронной эмиссии, описание технологии изготовления матричных автоэмиссионных катодов Спиндта и обсуждение использования приборов вакуумной микроэлектроники для усиления и генерации СВЧ сигналов.

Вместо введения: о трудности определений

Леонид Исаакович Манделъштам сравнивал определения с колочей проволокой. В своих знаменитых лекциях [1] он писал: «Планк как-то сказал, что правильная классификация - это уже высокий вид познания. Это несомненно: ведь правильно классифицировать - это значит давать довольно полные определения». Перефразируя Манделъштама, заметим: Совсем не легко дать определение того, что составляет предмет «вакуумной микроэлектроники». И все же начнем с определения, загородившись авторитетом А.Броди и Ч.Спиндта - признанных специалистов в этой новой области знаний. В вольном переводе определение из монографического обзора [2] звучит следующим образом.

Термин «вакуумная микроэлектроника» используется для описания приборов или компонент, 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 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 напыление 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 очерчен некоторый круг вопросов, которым занимается новая наука. Вакуумная микроэлектроника действительно нова и молода. По-видимому, официальной датой ее рождения следует считать 1988 год, когда в Вильямсбурге (США) состоялась Первая международная конференция по вакуумной микроэлектронике. Начиная с этого времени число публикаций в этой области растет экспоненциально (а может быть и быстрее - по законам взрывной неустойчивости). С 1988 года международные конференции проходят каждый год в разных странах мира.

**1. Немного истории по Айвору Броди:
четыре пути к вакуумной микроэлектронике.
Кен Шоулдерс - пророк в вакуумной микроэлектронике**

Конечно, историю науки пишут сами люди науки. Поэтому никак не избежать субъективного подхода к изложению даже одних и тех же фактов, к подбору важных событий, к оценке значимости того или иного специалиста, той или иной работы для развития научного направления. Важно и из какой страны мы смотрим на развитие этого научного направления: ведь есть пророки в своем отечестве, о которых не знают в отечествах других.

Основной доклад на Первой международной конференции по вакуумной микроэлектронике сделал Айвор Броди - один из основоположников этого направления. По мнению Броди вакуумная микроэлектроника приобрела огромное значение благодаря двум факторам общего характера: 1) возросли требования, которым уже не могут удовлетворить твердотельные приборы, даже после огромных исследовательских затрат, и, кроме того, 2) пришли к выводу, что отнюдь не будет непрактичным делать вакуумные лампы микронных и субмикронных размеров. Как заявил Броди: «Я уверен, что в будущем эта конференция будет играть историческую роль в эволюции электронных приборов, и что она будет первой из множества будущих таких конференций». Прошедшие годы показывают, что он был прав.

Как же по Айвору Броди развивалась вакуумная микроэлектроника? Он выделяет четыре основных пути ее развития, приведших к сегодняшнему состоянию (см. схему на рис. 1). Броди видит истоки в первых исследованиях вакуумного пробоя. В начале 20-х годов нашего столетия пробой заявил о себе в периодических срывах трансатлантических радиопередач, осуществляемых с помощью высокоомощных ламп Маркони. Госслинг, работавший у Маркони, исследовал этот эффект и в 1926 году опубликовал работу, в которой высказал гипотезу, что пробой вызывается электронами с выпуклостями на вольфрамовом стержневом катоде. Эти выпуклые неоднородности взрывались, вызывая пробой. Как пишет Броди, обсуждение этих результатов с профессором Фаулером из Кембриджского университета привело к Нордгейму, получившему средства на исследования, и в конечном счете, к уравнению Фаулера - Нордгейма, о котором речь пойдет позднее. Открытие того, что электроны могут вылетать с холодных катодов под действием электрических полей с высокой напряженностью, вызвало



Рис. 1. Схема, иллюстрирующая тезис А.Броди о четырех путях развития вакуумной микроэлектроники

множество проектов приборов, (см., например, [10]), но прошло более сорока лет прежде, чем что-то получилось. Вот, что препятствовало в тот период созданию приборов с автоэмиссионными катодами:

- 1) на электродах требовались напряжения от 2 кВ до 20 кВ;
- 2) электронная эмиссия была нестабильной и поток характеризовался высоким уровнем шумов;
- 3) требовалось давление менее 10^{-14} мм рт.ст. для приемлемого срока службы;
- 4) трудно было создать решетки из катодов для обеспечения высоких значений полного тока и высоких значений средней плотности тока с ограниченной поверхности;
- 5) трудно было обеспечить решетки с одинаковым фактором β - коэффициентом преобразования поля от острия к острию ($E = \beta V$, V - вытягивающее напряжение, E - напряженность поля у поверхности катода);

б) отсутствие эффектов пространственного заряда и радиальные эффекты при автоэмиссии потребовали переосмысливания конфигурации приборов.

В нашей статье будет кратко изложено, как преодолевались подобные препятствия. Причем, надо заметить, что исследователи пользовались не тем, что дает природа, а «обманывали» ее, научившись изготавливать идентичные конусные катоды высотой около 1 мкм и радиусом острия в несколько сот ангстрем, с расстоянием от острия до электрода в несколько тысяч ангстрем.

Броди подчеркивает, что пророком в вакуумной микроэлектронике был Кен Шоулдерс из Станфордского исследовательского института, который в 1961 году опубликовал выдающуюся работу [3], быстро поднявшую теорию и эксперимент в вакуумной микроэлектронике на очень высокий уровень. В обзоре [2] приведен перечень важных результатов в вакуумной микроэлектронике под названием «Значительные события для вакуумной микроэлектроники». Начинается перечень с имени Шоулдерса. Ниже приведены несколько первых строк из перечня.

1958	Первые планы изготовления приборов с линейными размерами порядка 0.1 мм	Бак и Шоулдерс
1961	Разработаны основы вакуумной микроэлектроники. Предложены вертикальные и горизонтальные микротриоды, использующие источники с полевой эмиссией; исследовано использование электроннопучковой технологии.	Шоулдерс
1968	Первое сообщение об изготовлении и работе микрокатодов с полевой эмиссией, использующих тонкопленочную технологию и молибденовые острия (катода Спиндта).	Спиндт

Можно с уверенностью сказать, что последнее открытие стало революционизирующим для вакуумной микроэлектроники. Но вернемся в 1961 год. На русском языке широко известна работа Шоулдерса «Комплексные системы на микроминиатюрных электровакуумных приборах» [4]. Для наших целей достаточно воспроизвести один небольшой фрагмент этой статьи.

«В ходе исследовательской фазы работы над компонентами были изготовлены триоды микронных размеров с автоэлектронным катодом. Эти приборы характеризуются большим коэффициентом усиления по мощности и плотностью анодного тока порядка нескольких миллионов А/см² при расчетном времени переключения менее 10^{-12} с. На рис. 2 изображен активный элемент с автоэлектронным катодом. Такой элемент имеет многослойную пленочную структуру, а ее коэффициент усиления по напряжению лежит в пределах от 0.5 до

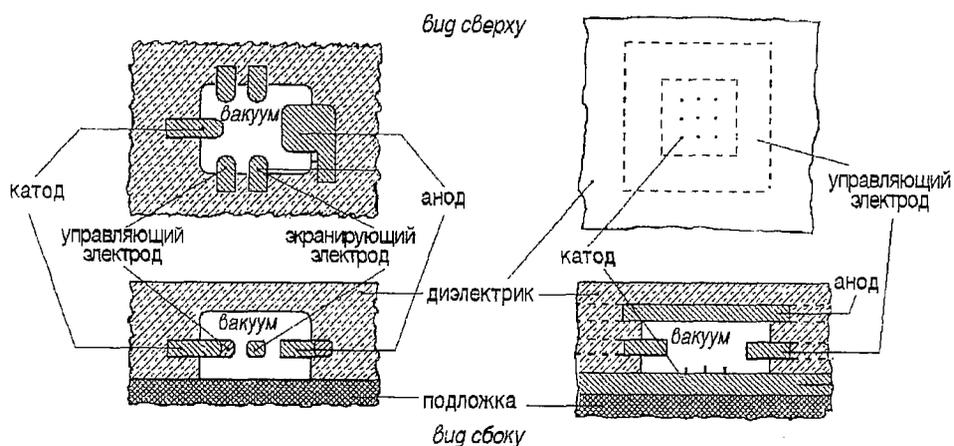


Рис. 2. Триод Шоулдерса с автоэлектронным катодом

нескольких сотен в зависимости от формы прибора. Оптимальное рабочее напряжение для этих приборов находится вблизи 50 В при минимуме 20 В и максимуме 100 В. При токе 0.1 мА плотность тока на аноде получается порядка 10^4 А/см². При работе верхний предел по плотности тока достигал 10^8 А/см². Расчетная величина времени переключения при 0.1 мА равна 10^{-10} с. Ток прибора в состоянии покоя равен около 10^{-14} А. Такая низкая величина тока покоя очень важна при построении на основе таких приборов больших матриц».

В это же время разрабатывался и иной подход к уменьшению габаритов приборов - микроминиатюризация обычных электровакуумных приборов с термоэлектронными катодами. В нашей стране в области миниатюризации СВЧ вакуумных приборов несомненным лидером является М.Б.Голант. Наиболее полно полученные им результаты отражены в монографии [5] и книге [6].

Второй путь к вакуумной микроэлектронике связан с удивительным совершенствованием технологии за последние 20 лет: «... Один микрон сейчас также обычен, как десять микрон десять лет назад, а четверть микрона, вполне возможно, будет обычной в ближайшем будущем» - предсказывает А.Броди.

И более того, оказалось, что оборудование и технологии, разработанные для интегральных схем (производство жидкого кремния, нанесение тонких пленок, химическое и плазменное травление, оптическая, электронно-пучковая, ионно-пучковая и рентгеновская литография и др.) пригодны для изготовления вакуумных микроэлектронных приборов.

Третий путь - микроскопия. Развитие технологии вакуумных ламп привело к созданию электронного микроскопа [7]. Причем, любопытно, что появление сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) было решающим для полного понимания не только технологии изготовления, но и работы приборов. Броди пишет: «Без него мы не смогли бы увидеть, что происходит». Именно СЭМ привел к электронно-пучковой литографии. Очевидно, что для создания приборов все меньших и меньших размеров потребуются микроскопы с атомным разрешением. По мнению Броди, сканирующий туннельный микроскоп [8] окажется для подобных целей наиболее подходящим, поскольку он дает наименьшие искажения наблюдаемого объекта.

Наконец, четвертый путь - изучение живых клеток. Клетки - «машины» микронных размеров со сложными и разнообразными химическими и физическими функциями, осуществляемыми на молекулярном уровне. В этой области идет непрерывное обновление представлений. Недавно было установлено, что билипидные слои, которые образуют стенки клетки и способны контролировать происходящее внутри и вне клетки, являются двойными слоями из пленок Лэнгмюра - Блоджетт [9]. Под лэнгмюровскими пленками чаще всего понимают мономолекулярные слои поверхностно-активных органических веществ,

находящихся на границе раздела жидкой (как правило, это вода) и газообразной (воздух) фаз. Если же эти монослой переносить на твердую подложку, то получится твердая мономолекулярная или мультимолекулярная пленка, называемая пленкой Лэнгмюра - Блоджетт. Наиболее известный пример - растекание масла по поверхности воды. Подобные пленки сейчас активно изучаются применительно к микроэлектронным приборам. Предложено также использовать копирующие свойства некоторых полимеров для создания молекулярной литографии. Броди считает, что многое из полученного в молекулярной инженерии оказало серьезное влияние на идеологию создания сверхмалых вакуумных приборов. Заключает свой доклад Броди следующим любопытным текстом: «...пора рассматривать вакуум как материал со специфическими свойствами, который может иметь субмикронные размеры и почти атомные допуски. Для электронных приборов главная трудность состоит в том, чтобы в этом материале электроны оказались в достаточных количествах и с разбросом по энергиям, сравнимым с разбросом электронов в зоне проводимости полупроводника». Броди видит основной путь преодоления всех трудностей для вакуумной микроэлектроники в использовании автоэлектронной эмиссии.

Мы воспользовались готовой историей вакуумной микроэлектроники - историей по Айвору Броди. По-видимому, с других позиций она выглядит иначе. В частности, более подробное обсуждение вакуумной ветви дано в нашей работе [10] и весьма полном обзоре [11].

«Обратно в будущее» - под таким символическим девизом прошла первая конференция в Вильямсбурге. По своей сути он сохранился и на последующих конференциях, хотя восторженность уступила место сдержанному оптимизму. Организаторы конференции подчеркивают, что, по их мнению, открылась новая эра миниатюрных вакуумных электронных приборов и вакуумных интегральных схем с автоэлектронной эмиссией (в некоторых случаях речь идет о микровакуумных приборах и интегральных схемах на основе термоэмиссионных катодов).

Эти новые приборы обладают сверхвысоким быстродействием (субпикосекундным), высокой устойчивостью к радиации, слабой чувствительностью к температуре и весьма большим 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 РЛС, телефонных системах сотовой связи и т.п. Особо перспективным представляется использование этих приборов для создания нового поколения сверхбыстрых компьютеров. В этом случае элемент памяти может быть создан на двух лампах по схеме 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 одном см^2 площади можно разместить около 10^6 элементов памяти, для которых мощность рассеяния составляет 20 Вт/ см^2 , так что в качестве основной выступает здесь проблема теплоотвода. В 1988 году на квадратном сантиметре размещали 10^4 микротриодов, так что мощность рассеяния составляла уже 2 Вт.

Интересным бытовым применением вакуумной микроэлектроники является разработка плоских панельных дисплеев, обеспечивающих изображение высокого качества и высокой яркости (в том числе и для цветного телевидения). В частности, на конференции в Вильямсбурге в докладе Холланда и Спиндта было сообщено о разработке вакуумного флуоресцентного экрана с холодным катодом Спиндта. В тонком вакуумно-флуоресцентном цветном дисплее использовалась матрично адресуемая группа автоэмиссионных острий для каждого цветного элемента индикатора. Электроны с острий фокусировались на близко расположенном люминофоре цветного элемента (разрешающая способность индикатора - около 40 линий/см, сторона панели - 8.3 см, толщина - 4мм). На конференциях обсуждалась также и возможность создания телевизионных экранов больших размеров, сверхвысокоярких и многолучевых электронных ламп и

трубок. Много внимания уделялось 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.

Три последних строчки в перечне значительных событий из [2] выглядят так.

1989	Получена полевая эмиссия при приложенном напряжении меньше 10В	Махов В.И.
1990	Получены острия с радиусом субнанометровых размеров из кремния	Маркус и др.
1990	Доложено о первом полностью действующем плоском катодолуминисцентном дисплее	Джис и др.

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

2. Автоэлектронная эмиссия - главное в вакуумной микроэлектронике. Закон Фаулера - Нордгейма

Автоэлектронная эмиссия - физическое явление, состоящее в том, что электроны покидают твердое тело, в котором они находятся в качестве свободных носителей заряда (это может быть металл или полупроводник), под действием сильного электрического поля, приложенного к поверхности. В случае автоэлектронной эмиссии электроны преодолевают потенциальный барьер на поверхности тела не за счет кинетической энергии теплового движения, а путем специфического квантового явления - туннельного эффекта (см., например, [12]).

В простейшем случае туннельный эффект заключается в том, что микроскопическая частица, первоначально находившаяся по одну сторону потенциального барьера (то есть области пространства, для которой полная энергия частицы \mathcal{E} превышает ее потенциальную энергию $U(x)$), может с конечной вероятностью быть обнаружена по другую сторону барьера.

Туннельный эффект является чисто квантовым феноменом и для него отсутствует аналог в классической механике. Согласно Ньютоновской механике частица с массой m не может находиться внутри потенциального барьера, поскольку из уравнения для полной энергии

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

следует, что соотношение $\mathcal{E} < U(x)$ выполняется только для минимальных значений импульса p . Объяснение туннельного эффекта в конечном счете связано с соотношением неопределенности 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

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

где $\hbar = 1.05459 \cdot 10^{-27}$ эрг·с - постоянная Планка¹. 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.

¹ В более общем случае соотношение неопределенностей связывает погрешности измерения любых двух канонически сопряженных величин A и B , для которых должно выполняться $\Delta A \Delta B \geq \hbar$.

Туннельный эффект был одним из первых квантовых явлений, предсказанных после создания в 1926 году Э. Шредингером волновой механики. По всей видимости, первыми указали на его существование Л.И.Мандельштам и М.А. Леонтович, которые исследовали решение уравнения Шредингера для модельного потенциала ангармонического осциллятора вида $U(x)=kx^2/2$ при $|x|<a$ и $U(x)=0$ при $|x|>a$. Они показали, что волновая функция, описывающая свободное движение частицы слева от потенциального барьера (при $x < -a$), имеет конечное по величине значение и справа от потенциального барьера (при $x > a$). При этом, когда энергия частицы близка к значениям дискретных уровней энергии внутри потенциальной ямы, амплитуда волновой функции справа от нее резко возрастает. Это явление на современном языке носит название резонансного прохождения через потенциальный барьер.

В 1928 году Г. Гамов с помощью туннельного эффекта объяснил явление α -радиоактивности тяжелых ядер, и в том же году Фаулер и Нордгейм [13] построили теорию холодной эмиссии с поверхности металлов. Туннельный эффект лежит в основе объяснения таких явлений, как слияние легких ядер при термоядерных реакциях, работы сверхпроводящего перехода Джозефсона и туннельного диода. Нас в наибольшей степени интересует объяснение автоэлектронной эмиссии, данное Фаулером и Нордгеймом.

На рис. 3 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 внешнего приложенного поля понижается высота потенциального барьера над уровнем Ферми² 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 ток автоэмиссии. Подчеркнем, что в случае автоэмиссии с поверхности металла

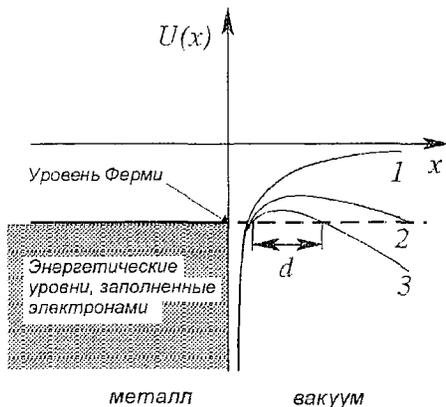


Рис. 3. Поверхностный потенциальный барьер на границе раздела металл - вакуум. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют случаям отсутствия внешнего поля, слабому полю и сильному полю; d - ширина барьера

электрическое поле не проникает вглубь него и не влияет на движение электронов в металле. Роль внешнего поля сводится только к изменению формы потенциального барьера, уменьшению его высоты и ширины.

Характеристикой одномерного туннельного эффекта³ является, так называемый коэффициент прозрачности D потенциального барьера. Он равен отношению потока прошедших через барьер частиц к падающему на барьер потоку. В частности, для прямоугольного барьера высотой U_0 и с конечной протяженностью a

$$D = D_0 \exp[(-2/\hbar)(2m(U_0 - \epsilon)a)^{1/2}]. \quad (3)$$

Вероятность прохождения не слишком мала, если показатель экспоненты не превышает по модулю единицы. Оценим

² При $T=0$ К все электроны в твердом теле стремятся занять наиболее низкие энергетические состояния. По принципу Паули на каждом уровне может находиться не более двух электронов с противоположно направленными спинами. Поэтому все состояния с энергией меньшей определенного значения заняты, а остальные - свободны. Это значение носит название энергии Ферми (уровня Ферми) и зависит от плотности электронов.

³ Заметим, что в широком понимании туннельный эффект означает возможность перехода системы микрочастиц из одного состояния в другое, если промежуточные состояния системы в классическом случае не могут осуществляться.

D , подставив в формулу (3) величины ядерных масштабов. Пусть $a \sim 10^{-13}$ см, $m \sim 10^{-23}$ г (масса нуклона), $U_0 - \phi \sim 10$ 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 $a \sim 1$ 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 F потенциальный барьер снижается по величине, приобретает конечную ширину, и становится возможным туннелирование электронов. Потенциальная энергия электрона описывается формулой

$$U(x) = \begin{cases} U_0 - eFx - e^2/(4x), & x > 0, \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (4)$$

В формуле (4) $(-eFx)$ - вклад внешнего приложенного поля, $-e^2/(4x)$ - вклад силы изображения, e - заряд электрона. Современные исследования показывают, что формула (4) справедлива при $x > 3$ Å [14]. Форма потенциального барьера при $x < 3$ Å зависит от конкретной поверхности металла.

В рамках этой модели плотность тока автоэмиссии выражается зависимостью

$$J = AF^2 \exp(-B\phi^{3/2}/F), \quad (5)$$

где ϕ - работа выхода, измеряемая в электронвольтах, F измеряется в В/мкм, а J - в А/мкм²; 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, работы выхода.

Если построить график зависимости $\lg(J/F^2)$ от $1/F$, то получится прямая линия (рис. 4 [14]), которая носит название графика Фаулера - Нордгейма. Наклон линии позволяет определить значение работы выхода из соответствующей кристаллографической плоскости металла, однако это требует тщательного измерения напряженности поля на эмитирующей поверхности. Такие измерения, как правило, весьма затруднительны, поскольку эта поверхность имеет форму острия или лезвия. Поясним последнее.

Для получения автоэмиссионного тока на поверхности катода требуется создать напряженность поля 3-5·10⁷ В/см. Для типичного значения работы выхода $\phi=4.5$ эВ при этом достигается

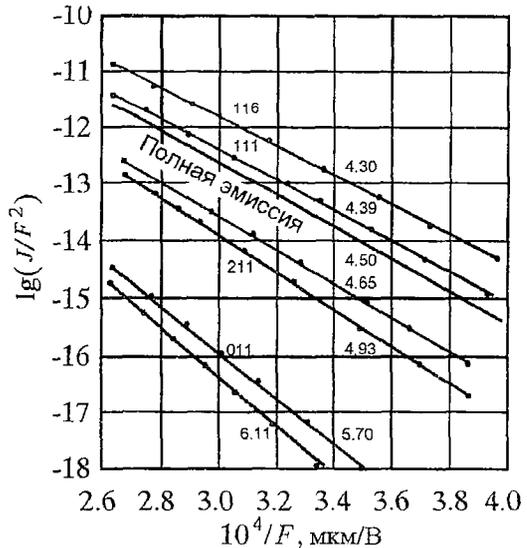


Рис. 4. Экспериментальные зависимости Фаулера - Нордгейма для различных кристаллографических плоскостей вольфрама. Числа около линий означают измеренные по этим данным значения работы выхода

плотность тока порядка 10^7 А/см². Предельные значения плотности тока могут достигать 10^{10} А/см². Очевидно, что такие значительные поля невозможно создать, если размер области однородного поля будет превышать несколько квадратных микрон из-за пробоя, который произойдет даже при очень высоком вакууме. Поэтому автоэлектронная эмиссия реализуется только на катодах, имеющих острейшую или лезвийную форму.

Подобные катоды весьма привлекательны: они обладают чрезвычайно большой плотностью тока, не требуют подогрева, практически безинерционны. Для применения устройств с автоэлектронной эмиссией в качестве элементов радиотехнических схем весьма важно, что вольт-амперная характеристика автокатада сильно нелинейна.

3. Катод Спиндта. Матрицы автоэмиссионных катодов. Триоды возвращаются?

Мы уже указывали, что научный мир узнал об успехах и перспективах вакуумной микроэлектроники сравнительно недавно - после Первой международной конференции 1988 г. Однако, пути к преодолению тех трудностей, которые препятствовали практическому использованию автоэмиссионных процессов, были намечены еще в начале 70-х гг., когда Ч.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 г., подробная статья вышла в 1976 г. [15]). Без преувеличения можно сказать, что вся вакуумная микроэлектроника вышла из этой работы, и без ссылки на нее не обходится добрая половина докладов, представленных на международных конференциях по вакуумной микроэлектронике.

Остановимся подробнее на результатах работы [15]. Тонкопленочный катод с полевой эмиссией представляет собой сэндвич: проводник-изолятор-проводник (рис. 5). Верхний проводник или сетка имеет круглое отверстие от 1 до 3 мкм в диаметре, сквозь которое протравлено отверстие до нижнего проводника. На подложке находится конусообразный эмиттер, его вершина располагается в отверстии сеточной пленки. Размеры для одного из изготовленных катодов приведены на рисунке. Высота конуса, радиусы острия и отверстия в сетке могут меняться при изменении параметров технологического процесса.

Технология изготовления катодов Спиндта заслуживает особого внимания. Она состоит из нескольких этапов.

- Получение стандартной высокопроводящей подложки из кремния. Эта подложка покрывается затем оксидной пленкой кремния требуемой толщины (1.5 мкм) с помощью техники окисления.

- Методом электронно-лучевого напыления на окисел наносится тонкая пленка молибдена толщиной 0.4 мкм.

- Эта структура покрывается полиметил-метакрилатом (ПММ) - высокополимерным соединением, которое представляет собой электронно-чувствительное сопротивление. Толщина пленки ПММ примерно 1 мкм.

- Поверхность ПММ экспонируется в вакууме сфокусированными электронными пучками, формируя на ней пятна нужного диаметра и

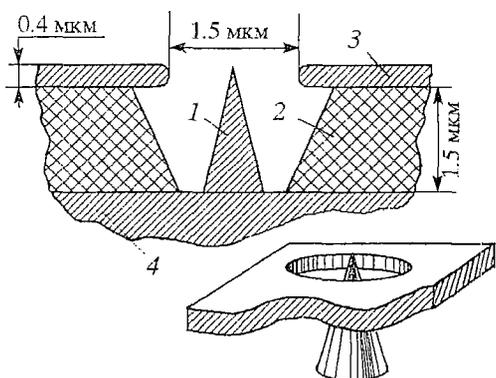


Рис. 5. Схематическое изображение тонкопленочного автоэмиссионного катода Спиндта: 1 - молибденовый корпус; 2 - изолирующий слой из двуоксида кремния; 3 - молибденовая управляющая пленка; 4 - кремниевая подложка

необходимой конфигурации. Пятна обычно имели диаметр около 1 мкм и располагались в узлах квадратной решетки с шагом 25.4 мкм или 12.7 мкм.

- Экспонированные участки растворяются в изопропиловом спирте, а затем происходит травление лежащего ниже этих участков слоя молибдена до диэлектрика.

- Удаляются остатки ПММ и слой диэлектрика травится плавиковой кислотой до кремниевой подложки. В результате образуется структура, показанная на рис. 6, а. Пленка молибдена слегка нависает над отверстием в диэлектрике, так как кислота не действует на молибден.

- Методом вакуумного напыления на молибден наносится пленка алюминия. При этом образец непрерывно вращается вокруг вертикальной оси и напыление происходит под большим углом к ней. Это делается, чтобы предотвратить попадание алюминия в отверстия в сетке. Размер отверстия уменьшается до необходимой величины (рис. 6, б).

- Через частично закрытое отверстия производится напыление молибдена, при этом внутри отверстия вырастает конус необходимого размера и высоты. Вершина конуса формируется, когда отверстие полностью закрывается. Эта стадия процесса показана на рис. 6, в.

- Вспомогательный слой алюминия растворяется, находящаяся на нем молибденовая пленка удаляется (рис. 6, г). После термической тренировки в вакууме катод готов к применению.

Используя такую технологию, были изготовлены катоды с 1, 100 и 5000 эмиттерами. Решетка со 100 эмиттерами имела вид матрицы 10×10 с шагом 25.4 мкм, так что полная область эмиссии представляла собой квадрат со стороной 0.25 мм. Решетка с 5000 эмиттерами заполняла круглую область диаметром 1 мм с расстоянием между конусами 12.7 мкм; таким образом плотность упаковки эмиттеров достигала $6.4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Область рабочих напряжений для катодов составляла от 100 до 300 В. Они работали при давлении 10^{-9} мм рт.ст., которое обеспечивалось непрерывной откачкой. Ток эмиссии с одного острья находился в пределах от 50 до 150 мкА. Полный ток с 100-острийного катода достигал 5 мА, что соответствует средней плотности тока с катода 8 А/см^2 . Для катода с 5000 острий в импульсном режиме

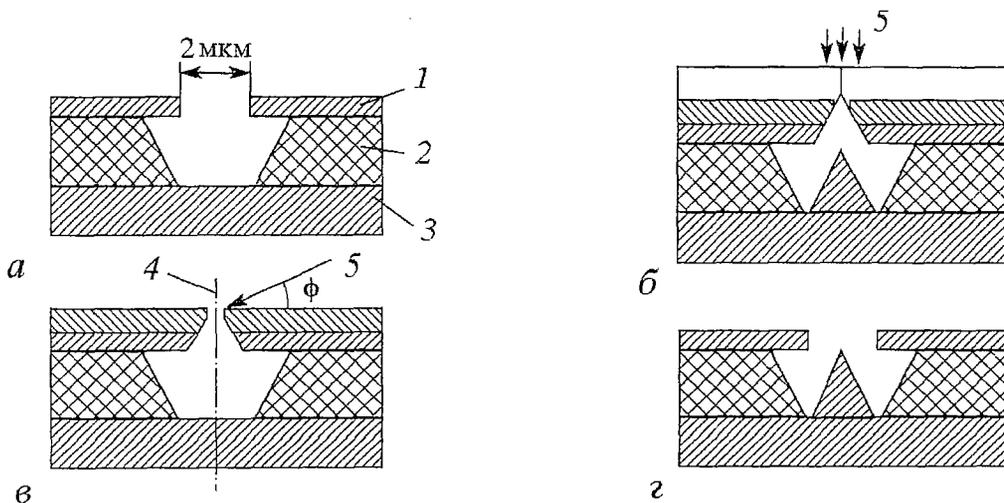


Рис. 6. Технология изготовления тонкопленочного катода [15]: а - исходная структура для формирования конуса; б - формирование изолирующего слоя; в - формирование конуса напылением; г - удаление изолирующего слоя. 1 - металлическая пленка; 2 - диэлектрик; 3 - кремниевая подложка; 4 - ось вращения; 5 - направление напыления

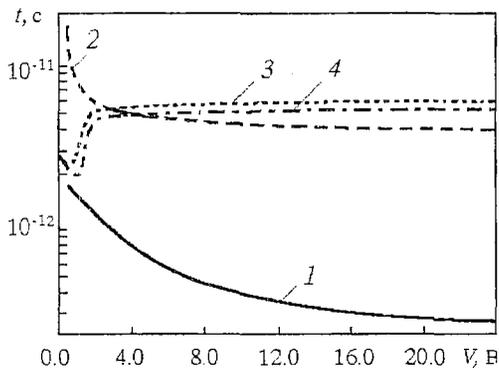


Рис. 7. Зависимость времени пролета электронов от напряжения для вакуума (1); фосфида индия (2); арсенида галлия (3) и кремния (4)

радиочастот. Известно, что быстродействие твердотельных устройств ограничено подвижностью электронов в зоне проводимости. В этом смысле преимущества вакуумного микротриода очевидны. На рис. 7 приведены зависимости времени пролета от приложенного напряжения для кремния, арсенида галлия, фосфида индия и вакуума. Из графиков следует, что предельная частота вакуумных приборов может быть повышена, по крайней мере, на порядок по сравнению с твердотельными. Кроме того, одним из возможных преимуществ вакуумных микротриодов является их радиационная и термическая стойкость. Именно эти обстоятельства привели, видимо, к появлению статей с утвердительными заголовками «Триоды возвращаются». К сожалению, вакуумный микротриод имеет «врожденные» недостатки, причины которых связаны с его конструктивными особенностями. И главный из них — малый коэффициент усиления. Увеличить коэффициент усиления можно было бы за счет опускания вершины эмиттера ниже уровня управляющего электрода (см., например, [17]), однако при этом резко уменьшается анодный ток. Разумный компромисс достигается, когда вершина эмиттера лежит вблизи плоскости нижней кромки управляющего электрода.

Наряду с автоэмиссионными катодами в виде металлических острий, полученных в результате напыления, многие научные группы занимаются разработкой технологий изготовления и изучением эмиссионных свойств катодов из полупроводниковых материалов, таких как кремний. Анализ требований, предъявляемых к современным источникам автоэмиссии, проведенный Г. Греем (Н. Gray — один из авторитетных в вакуумной микроэлектронике исследователей), показал, что они должны обеспечивать:

- высокую крутизну, плотность тока и низкую межэлектродную емкость катодов для возможности их применения в СВЧ и миллиметровом диапазонах;
- высокую плотность тока для использования в электронно-лучевых трубках;
- высокую яркость и малый размер источника для использования в сканирующих электронных микроскопах и установках для электронно-лучевой литографии;

⁴ Разумеется, эти результаты уже не уникальны. Так, на 6-й Международной конференции (США) сообщалось о создании решеточных 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 создавалась с использованием методов лазерной голографии. Были изготовлены катоды с 9000 эмиттерами, расположенными в решетке размером 30×30 мкм и с 800 эмиттерами, расположенными в решетке размером 9×9 мкм. Рабочее напряжение на управляющем электроде около 30 В, на аноде — 200 В. Расстояние между управляющим электродом и удаленным анодом — примерно 100 мкм. Катод с 800 эмиттерами в рабочем режиме дает ток около 0.1 мА, что соответствует средней плотности тока 120 А/см² [16].

был получен ток до 100 мА (плотность тока достигала 12 А/см²)⁴.

Из вышеизложенного ясно, что матричный автоэмиссионный катод есть не что иное, как вакуумная трехэлектродная лампа микронных размеров, то есть триод. Конусообразный эмиттер выполняет роль катода, управляющие электроды — роль сетки, кроме того, существует удаленный анод, который выступает в качестве коллектора электронов. В начале развития вакуумной микроэлектроники появились надежды, что малые размеры устройства позволят использовать его в качестве элемента радиотехнических схем на СВЧ частотах, подобно тому, как обычный вакуумный триод работает в диапазоне

низкую стоимость, большие размеры экрана и однородность эмиссии для плоских дисплеев.

Решетки автоэмиссионных катодов, изготовленные из монокристалла кремния удовлетворяют всем этим требованиям. Кремний является очень удобным материалом для изготовления автокатодов. Он имеет работу выхода 4.2 эВ, сравнимую 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, содержащие традиционные МОП-элементы и биполярные транзисторы. Кроме того, разработаны методы изготовления острий из кремния с радиусом кривизны атомарных размеров (менее 10 Å), что позволяет существенно понизить рабочее напряжение. Изготовлены решетки острий размером 10×10 и 80×80 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 мкА.

Пожалуй, самое замечательное свойство кремниевых катодов в том, что форма образующего острия, радиус кривизны его вершины и высота практически идентичны для всех элементов решетки. Однако, по сравнению с металлическими, кремниевые катоды имеют более низкую плотность тока, что связано с физической природой механизма проводимости в полупроводниках. Возможным способом преодоления этого ограничения является использование кремниевых эмиттеров, покрытых тонким слоем металла, в качестве которого могут выступать вольфрам, титан, тантал, платина, палладий и золото.

Отличительной особенностью описанных выше автоэмиссионных катодов является вертикально расположенное острие. Между тем, еще в середине 60-х годов была высказана и практически реализована идея микровакуумных автоэмиссионных диода и триода, в которых эмиссия происходила с края тонкой металлической пленки, напыленной на диэлектрическую подложку [18] (рис. 8). Толщина эмитирующей кромки составляла 100-200 Å, расстояние анод-катод - 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. Основные трудности в работе с такими приборами были связаны с получением атомарно-гладкой поверхности эмитирующей кромки для обеспечения равномерной эмиссии, а также нестабильность эмиссии во времени.

В настоящее время автоэмиссионные триоды (транзисторы) с горизонтальной геометрией рассматриваются как основные кандидаты для работы на сверхвысоких частотах благодаря присущей их конструкции низкой емкости между эмиттером и управляющим электродом. Для увеличения напряженности поля вблизи катода эмитирующий электрод выполняется в виде гребенки с зубцами прямоугольной или треугольной формы. Создан также и микровакуумный аналог тетрода: был введен дополнительный четвертый электрод между управляющим электродом и анодом, что позволило получить практически линейную

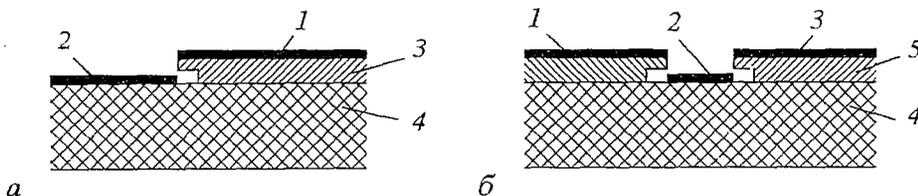


Рис. 8. Микровакуумные устройства с горизонтальной геометрией: а - диод: 1 - катод, 2 - анод, 3 - пленка, задающая рельеф, 4 - диэлектрическая подложка; - триод: 1 - катод, 2 - управляющий электрод, 3 - анод, 4 - диэлектрическая подложка; 5 - пленка, задающая рельеф

передаточную характеристику прибора, если в качестве входного использовался контрольный электрод.

Следует заметить, что активный поиск новых материалов, подходящих для создания автокатодов, ведется непрерывно. Одним из таких материалов, имеющих уникальные свойства, оказался алмаз. Отрицательное электронное сродство, присущее алмазу, сделало возможным эмиссию электронов при низких напряженностях электрического поля (менее 1 В/мкм). Благодаря устойчивой структуре кристаллической решетки алмаза, возможно создание более стабильных катодов, чем металлические.

Для многих приложений, например, для использования в плоских дисплеях или для создания источников электронов в мощных СВЧ приборах, нет необходимости в том, чтобы катод имел регулярную структуру в виде периодических острий. Поэтому особый интерес вызывает исследование автоэлектронной эмиссии из тонких пленок аморфного алмаза. Такие пленки получают путем испарения графита в вакуумной камере в луче мощного Nd-YAG-лазера. Испаренный графит осаждается на подложку из стекла, кремния или различных металлов, образуя аморфную пленку. В экспериментах получена плотность тока в пределах 0.1-1 мА/мм² при приложенных полях 20-40 В/мкм. Такие плотности тока достаточны для использования в плоских дисплеях. В отдельных случаях регистрировались плотности тока до 100 мА/мм². Оценки работы выхода, произведенные по измеренным эмиссионным характеристикам, показали, что она действительно имеет очень малое значение.

4. Распределенный усилитель с автоэмиссионными катодами - наиболее естественный прибор вакуумной микроэлектроники. Гигатрон

Наиболее популярной схемой вакуумной СВЧ микроэлектроники оказалась схема распределенного усилителя, предложенная еще в 1937 г. (естественно, в ламповом варианте) и подробно описанная в 1948 г. Хотя в свое время эта схема не была широко использована, следует отметить, что она блестяще разрешила на уровне ламповых усилителей проблему сочетания высокого коэффициента усиления с широкой полосой. Усилитель представляет собой набор одинаковых триодов, у которых все сетки и все аноды присоединены, соответственно, к сеточной (входной) и анодной (выходной) длинным линиям из LC цепочек (рис. 9). Волна, возбужденная входным сигналом в сеточной линии, модулирует анодные токи триодов, каждый из которых возбуждает в выходной линии прямую и встречную волны. При идеальном согласовании линий и их идентичности все прямые волны сложатся в фазе, а встречные - взаимно погасят друг друга, так что амплитуда напряжения в выходной линии будет возрастать по длине.

Несмотря на свои неоспоримые достоинства, схема распределенного усилителя практически не была востребована в радиотехнике того времени. Интерес к ней начал возрождаться в 80-ые годы, сначала в полупроводниковой микроэлектронике, (в монолитных интегральных схемах с арсенид - галлиевыми полевыми транзисторами), а затем и в вакуумной микроэлектронике, для которой

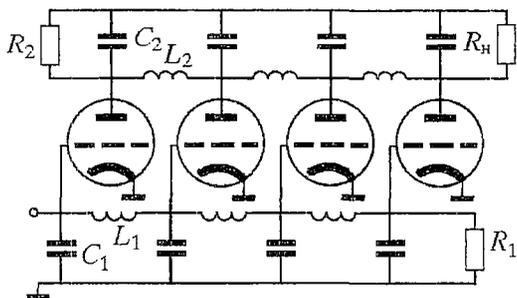


Рис. 9. Схема распределенного усилителя

эта схема оказалась очень органичной, самым естественным образом связанной с ее технологическими особенностями. Если бы эта схема не была известна ранее, она неизбежно бы появилась в микроэлектронном варианте (вернее всего, так оно и было, а о старой идее вспомнили уже потом). Действительно, решетка автоэмиссионных спиндтовских катодов, дополненная сверху анодной пленкой, представляет собой почти готовую конструкционную основу



Рис. 10. Схема микрораспределенного усилителя с решеткой автоэмиссионных катодов

распределенного усилителя, в которой микрополосковая линия, образованная катодной и управляющей пленками, играет роль входной линии, а подобная же линия, образованная управляющей и анодной пленками, является выходной (рис. 10).

Несмотря на простоту подобной схемы, ее реализация оказалась достаточно затрудненной. Причиной этого являются все еще низкие достигнутые значения крутизны микротриодов, и так называемое «электронное затухание» (модулированный анодный ток возбуждает во входной линии ВЧ напряжение, противофазное входному напряжению, что приводит к уменьшению входного напряжения, это эквивалентно появлению во входной линии активной проводимости, численно равной крутизне микротриода).

Представляется перспективным использование матриц автоэммиттеров в релятивистской электронике. Здесь интересен проект гигатрона (см., например, [10]) - компактного усилителя с высоким КПД для линейного ускорителя на встречных пучках в диапазоне частот от 10 до 30 ГГц, когда потребуется импульсная управляющая мощность порядка 100 МВт/м. Это типичное устройство с модуляцией эмиссии: сгустки электронов, создаваемые матричным катодом Спиндта, ускоряются при прохождении высоковольтной диодной структуры и возбуждают волноводную выходную структуру.

Можно выделить следующие положительные особенности гигатрона.

1. В гигатроне используется ленточный электронный пучок (рис. 11), что позволяет снизить дефокусирующее действие пространственного заряда и увеличить предельно допустимый ток, для чего нужно просто увеличить ширину пучка.

2. В качестве выходного элемента связи используются устройства с бегущей волной.

3. Наиболее важным элементом конструкции гигатрона является решетка из автоэмиссионных катодов (они способны эмитировать электронный поток с плотностью 100 А/см² в импульсном и 1 А/см² в непрерывных режимах), размещенных в модулирующем волноводе.

При использовании волноводных элементов связи наблюдается запаздывание

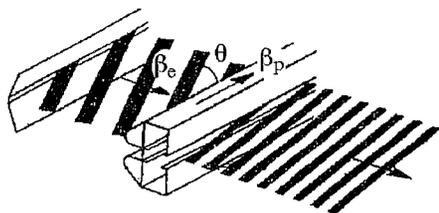


Рис. 11. Ленточный электронный поток, пересекающий элемент связи с бегущей волной

при образовании электронных сгустков вдоль волновода волновод большую реактивную нагрузку; это может привести в широком электронном пучке к тому, что часть пучка ускоряется, а часть тормозится. Чтобы избежать этого, пучок модулируют так, что его фронт образует угол с направлением движения электронов. Поскольку речь идет о релятивистских пучках, существенными оказываются ВЧ поля в волноводе, которые заставляют наклониться фронт пучка на некоторый угол. Вызванные указанными причинами

углы наклона пучка почти одинаковы, поэтому для сохранения постоянной фазы можно наклонить выходной элемент по отношению к оси пучка, а не сам пучок.

Как уже указывалось, в гигатроне для создания электронного пучка с модулированной эмиссией используется решетка из автоэмиссионных катодов, работающих в импульсивном режиме. Эта решетка размещена в модулирующем волноводе, который представляет собой цепочку из связанных резонансных элементов. Такая конструкция нужна потому, что эмиттерная решетка вносит в модулирующий волновод большую реактивную нагрузку. Предполагается, что такой прибор на частоте 18 ГГц будет обеспечивать коэффициент усиления по мощности 27 дБ с ожидаемой выходной мощностью 10 МВт и КПД, равным 74%.

5. Туннельный микроскоп. О некоторых применениях вакуумной микроскопии

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

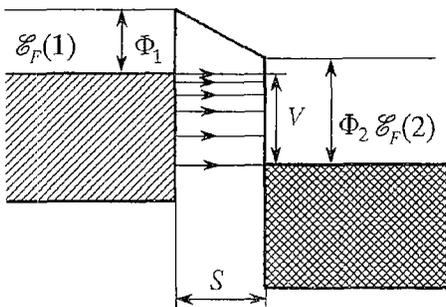


Рис. 12. Энергетическая диаграмма туннельного перехода в системе металл - диэлектрик - металл

Работа СТМ основана на эффекте тунелирования электронов сквозь узкий потенциальный барьер между металлической поверхностью и зондом, которым служит тонкое острие. Энергетическая диаграмма туннельного перехода для системы металл - диэлектрик - металл показана на рис. 12. Толщина диэлектрика определяет ширину потенциального барьера, в то время как его высота и форма определяются величинами работ выхода Φ_1 и Φ_2 и разностью потенциалов V между металлами.

В СТМ (рис. 13) 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 для получения туннельного тока. Это происходит при расстоянии $S \sim 10 \text{ \AA}$, когда волновые функции электронов ближайших друг к другу атомов острия и образца перекрываются. При разности потенциалов $V \ll \Phi$ плотность туннельного тока определяется формулой

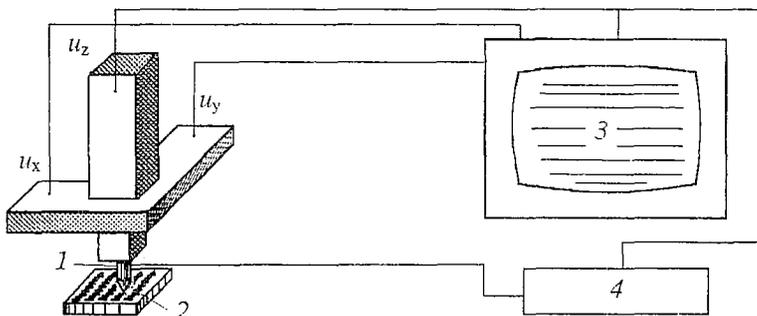


Рис. 13. Устройство сканирующего туннельного микроскопа: 1 - зонд; 2 - изучаемый объект; 3 - дисплей; 4 - система обратной связи

$$j \approx k_0 V \exp(-2k_0 S) / (4\pi^2 S), \quad (6)$$

где S - эффективное туннельное расстояние в \AA , k_0 - постоянная затухания плотности волновых функций в туннельном зазоре ($k_0 = (2m\Phi/\hbar^2)^{1/2}$), где $\Phi \approx (\Phi_1 + \Phi_2)/2$ - высота эффективного барьера. Для типичных величин работы выхода $\Phi \sim 4.5$ эВ, $k_0 \sim 1.1 \text{\AA}^{-1}$. Характерная величина туннельного тока составляет 10^{-9}\AA , при $V \sim 0.01$ В и $S \sim 10 \text{\AA}$. Из соотношения (6) следует, что при изменении расстояния на 1\AA величина туннельного тока изменяется на порядок.

Для сканирования исследуемой поверхности используются прецизионные пьезоэлектрические манипуляторы. Из-за пьезоэффекта изменением напряжения на электродах на 0.1 В можно удлинить стержень на 0.1 нм, то есть на величину поперечника атома. Слой металла на поверхности манипулятора достаточно тонок, чтобы, растягиваясь, не препятствовать этому перемещению.

Конструкция из трех стержней-манипуляторов, соединенных в одной точке перпендикулярно друг другу (см. рис.13), может передвигать зонд, помещенный в месте соединения, во всех пространственных направлениях. Три управляющих напряжения u_x , u_y и u_z - задают координаты смещения зонда x , y и z . Изменяющиеся напряжения u_x и u_y перемещают зонд по поверхности исследуемого предмета, сканируя ее по параллельным строкам, отстоящим друг от друга на заданное расстояние (как луч на телевизионном экране). Напряжение u_z двигает зонд вверх и вниз. Если u_z поддерживать неизменным, то при сканировании поверхность из-за неровностей будет удаляться или приближаться к зонду. Это неудобно для регистрирующей системы - сигнал сильно меняется. Кроме того, при больших неровностях зонд может сталкиваться с ними. Чтобы избежать этого, в прибор вводят обратную связь, которая заставляет зонд двигаться вверх и вниз в соответствии с рельефом поверхности. Обратная связь представляет собой сложную и чувствительную электронную схему, улавливающую изменение туннельного тока и изменяющую напряжение u_z , приложенное к вертикальному манипулятору. Пьезоэлектрический манипулятор перемещает зонд так, чтобы туннельный ток оставался постоянным (скажем, $I = \text{const}$ с точностью, например, 2%). Это возможно лишь при сохранении неизменным расстояния между зондом и поверхностью (поддерживать постоянной величину S можно с точностью 0.01\AA). Этот режим работы называется режимом постоянного тока. Таким образом, обратная связь не дает зонду ни отойти от поверхности, ни столкнуться с ней. В результате острие движется по траектории, повторяющей рельеф сканируемой зондом поверхности. Поскольку напряжение u_z пропорционально высоте места поверхности, над которым в данный момент находится острие, оно служит удобной мерой рельефа. Информация о рельефе поверхности записывается в память ЭВМ и после обработки (фильтрации шумовых и паразитных сигналов) выводится на дисплей в виде «топографической» карты поверхности. Обычно карта полутоновая, то есть на ней высота рельефа обозначается интенсивностью раскраски.

В настоящее время с помощью сканирующих туннельных микроскопов получены детальные изображения поверхностей многих кристаллических и полимерных материалов с атомным разрешением. Сканирующий туннельный микроскоп имеет беспрецедентное увеличение - 10^8 ! Важность СТМ для вакуумной микроэлектроники очевидна: без него не разглядеть то, что создается.⁵

⁵ Поскольку манипуляторы можно перемещать с точностью, соответствующей атомным размерам, острие СТМ можно использовать как инструмент для работы в нанометровом диапазоне. Острием толщиной в один атом можно точно попасть в выбранное место молекулы и разрезать ее на части; можно «подцепить» какой-нибудь атом и перенести его в нужное место. В лаборатории фирмы IBM ученым удалось сделать надписи, выложенные из шпечек атомов. Надпись, символизирующая эмблему фирмы, была составлена из отдельных атомов ксенона на поверхности кристалла Ni. Она собрана острием туннельного микроскопа из хаотически разбросанных на поверхности атомов ксенона, прилипших к Ni. Чтобы из-за теплового движения атомы не разбегались по поверхности, опыт проводился при очень низкой температуре -269° С. Конечно, это - реклама, но и демонстрация возможностей СТМ.

Выше уже указывалось, что катоды с полевой эмиссией могут быть использованы для создания плоских дисплеев, которые могут использоваться и как информационные транспаранты и в качестве телевизионных трубок, и как дисплеи для портативных компьютеров. Цветное изображение на экране, покрытом люминофором (обычно это ZnO) формируется с помощью так называемых пикселов. Каждый пиксел имеет квадратную форму со стороной 250 мкм, так что на одном квадратном миллиметре умещается 16 элементов. Источниками электронов являются решетки полевых эмиттеров лезвийной формы с плотностью около 10^6 эмиттеров/см². 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.

Пиксельные элементы размещены в прямоугольной матрице, так что катоды в каждой строке образуют единую (горизонтальную) адресную линию, а управляющие электроды - три вертикальные линии на каждый столбец. Таким образом, каждый пиксел может быть адресован индивидуально.

Интерес к дисплеям с полевой эмиссией резко возрос после того, как специалистами из французской исследовательской лаборатории LETI (г.Гренобль) были продемонстрированы действующие монохромные и цветные дисплеи с размером 15 см по диагонали для телевидения и мониторов компьютеров. Основные достоинства, которые обеспечивает микровакуумная технология, - высокая яркость изображения, низкое рабочее напряжение, полноцветность и чистота цвета, малая потребляемая мощность, быстрый отклик (менее 1 мкс).

Еще одной областью использования катодов с полевой эмиссией является создание микросенсоров, которые могут работать как датчики давления, акселерометры, измерители микроперемещений, элементы микрофонов. В микросенсоре коллектор решетки микрокатодов представляет собой упругую проводящую пластину, смещение которой зависит от внешнего давления. Поскольку напряженность поля на острие зависит от расстояния до коллектора, его смещение будет изменять ток эмиссии. Известны экспериментальные данные для микросенсора с полевыми микрокатадами, изготовленными на основе кремниевой технологии. В режиме постоянного тока (при изменении прогиба изменяется напряжение, чтобы не менялся ток) измеренная чувствительность при общем токе 1 мкА составляла 6.6 В/мкм. В режиме постоянного напряжения (при смещении пластины регистрируется изменение тока) при изменении смещения от 0.3 до 2 мкм ток изменялся на два порядка (рабочее напряжение было равно 4000 В).

Вместо заключения. Что еще можно придумать?

Первое, что приходит в голову при попытке ответить на поставленный вопрос, это идея о создании активной нелинейной вакуумной среды с автоэмиссионными вкраплениями⁶.

До создания современных автоэмиссионных катодов подобная идея не представлялась реализуемой. В настоящее время, когда созданы микроминиатюрные активные элементы, есть все основания для разработки по крайней мере теории и проведения аналогового моделирования такой среды. Моделью такой среды может служить цепь с активными вакуумными элементами, в которых ток и поле связаны законом Фаулера - Нордгейма. Подобный способ «создания» сред-моделей широко используется в радиофизике (см., например,

⁶ Один из авторов не раз обсуждал эту идею с Д.И. Биленко (Саратовский университет), а позднее слышал ее от Н.А. Арманда (ИРЭАН, Москва). По-видимому, впервые, правда, в весьма туманной форме ее высказывал все тот же Кэн Шоулдерс в 1965 году [3].

[19]). Простейший вариант активной среды-модели - цепочка (или решетка) из связанных автогенераторов.

Автогенератор на микротриоде можно построить, вводя положительную обратную связь в усилитель (подобно обычному ламповому генератору). Однако, из-за отсутствия насыщения нелинейной характеристики автоколебания в таком генераторе будут бесконечно нарастать, приводя при больших значениях токов к разрушению катода. Чтобы скомпенсировать рост сигнала, нужно в цепь обратной связи ввести диссипативный элемент с нелинейной характеристикой, при которой возможно возникновение стационарных колебаний.

В наших работах [20,21] показано теоретически и в аналоговом радиотехническом эксперименте, что такой автогенератор представляет собой активный нелинейный элемент со сложным поведением, включая режимы хаотических колебаний. Поэтому на его основе можно построить среды-модели, например, цепочки и решетки генераторов. Такие среды можно использовать для обработки изображений и решения других задач, связанных с искусственным интеллектом и обработкой больших объемов информации на принципах нейродинамики.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 95-02-06261а)

Библиографический список

1. *Мандельштам Л.И.* Лекции по теории колебаний. М.:Наука, 1972. 470 с.
2. *Brodie I., Spindt C.A.* Vacuum microelectronics//Advances in electronics and electron physics. Academic Press, 1992. Vol.83. P.2.
3. *Shoulders K.R.* Microelectronics using electron beam activated machining techniques /Ed. F.L.Alt // Advances in Computers. 1961. Vol.2. P.135.
4. *Шоулдерс К.* Комплексные системы на микроминиатюрных электровакуумных приборах// Микроэлектроника и большие системы. М.: Мир, 1967. С.119.
5. *Голант М.Б., Бобровский Ю.Л.* Генераторы СВЧ малой мощности. Вопросы оптимизации параметров. М.: Сов. радио, 1977. 336с.
6. *Голант М.Б., Бобровский Ю.Л.* Минитроны. М.: Сов. радио, 1983. 96с.
7. *Руска Э.* Развитие электронного микроскопа и электронной микроскопии// УФН. 1988. Т.154, вып.2. С.243.
8. *Биннинг Г., Рорер Г.* Сканирующая туннельная микроскопия - от рождения к юности // УФН. 1988. Т.154, вып.2. С.261.
9. *Блинов Л.М.* Ленгмюровские пленки // УФН. 1988. Т.155, вып.3. С.261.
10. *Исаев В.А., Соколов Д.В., Трубецков Д.И.* Электронные СВЧ-приборы с электростатическим управлением и модуляцией эмиссии // РЭ. 1990. Т.35, вып.11. С.2241.
11. *Бондаренко Б.В., Шешин Е.П., Шука А.А.* Приборы и устройства электронной техники на основе автокатодов // Зарубежная электронная техника. 1979, № 2. С.3.
12. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: Наука, 1989. 768с.
13. *Fowler R.H., Nordheim L.W.* Electron emission in intensive fields// Proc.R.Soc. London. A., 1928. Vol.119. P.173.
14. *Модинос А.* Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия. М.: Наука, 1990. 320с.
15. *Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R.* Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones // Journal of Applied Physics. 1976. (December). Vol.47, № 12. P.5248.
16. *Bozler C.O., Harris C.T., Rabe S., Rathman D., Goodhue W.D., Hollis M.A., Smith U.I.* Arrays of gated field-emitter cones having 0.32 μm tip-to-tip spacings: Sixth

Int. Vacuum Microelectronics Conf. Newport, USA, July 12-15, 1993. Technical Digest. P. 160.

17. Дюжев Н.А., Козлов А.И., Махов В.Н., Серовайский В.М. Быстродействие микроэлектронных триодных структур с автоэлектронными катодами // Микроэлектроника. 1990. Т.19, вып.5. С. 478.

18. Чесноков В.В. Электронные лампы с автоэлектронными катодами // Электронная техника. Сер. Приемно-усилительные лампы. 1968. № 4. С. 3.

19. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984 (первое издание). 432с.; 1992 (второе издание). 456 с.

20. Пономаренко В.И., Трубецков Д.И. Сложная динамика радиотехнической модели - аналога автогенератора на вакуумном микротриоде // Доклады РАН. 1994. Т. 337, № 5. С. 602.

21. Пономаренко В.И., Трубецков Д.И. Сложная динамика автогенератора на вакуумном микротриоде: вычислительный и аналоговый эксперименты на радиотехнической модели // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 6. С. 56.

VACUUM MICROELECTRONICS - BURDEN OF EXPECTATIONS

D.I. Trubetskov, A.G. Roznev, D.V. Sokolov

The article presents a popular introduction into a new branch of modern electronics - vacuum microelectronics. It contains historical review, brief theory of electron field emission, description of technologies for thin-film cathode arrays and discussion of vacuum microelectronics devices application for microwave amplification and generation.



Рожнев Андрей Георгиевич родился в Саратове в 1959 году. Окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1981). Старший научный сотрудник НИИ механики и физики при СГУ. Преподаст в Колледже прикладных наук при СГУ. Автор более 40 публикаций. В соавторстве с Д.И. Трубецковым и Д.В. Соколовым опубликовал книгу «Лекции по вакуумной СВЧ микроэлектронике». Область научных интересов - электроника СВЧ, теория волн, численные методы электродинамики, вакуумная микроэлектроника.



Соколов Дмитрий Валерьевич родился в 1940 году, окончил физический факультет Саратовского университета (1963). Старший научный сотрудник НИИ механики и физики при СГУ, кандидат физико-математических наук (1986). Область научных интересов - электроника СВЧ и вакуумная СВЧ микроэлектроника, нелинейная динамика электронных потоков. Имеет около 50 публикаций, соавтор учебного пособия «Лекции по сверхвысокочастотной вакуумной микроэлектронике» (1996). Полупрофессиональное хобби - оформление журнала ПНД.