

УДК 537.533.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК В СОСТАВЕ МОЩНОГО КОМПРЕССОРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

О. А. Иванов¹, М. А. Лобаев¹, В. В. Чернов^{1*}, А. Л. Вихарев¹, А. М. Горбачёв^{1,2},
В. А. Исаев¹

¹ Институт прикладной физики РАН;

² Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты исследования эмиссионных свойств молибденовых катодов с алмазным напылением при сильных токах и зависимости этих свойств от режимов напыления и структуры алмазных плёнок. Эмиссионные характеристики последних определялись путём анализа выходных параметров мощного компрессора сверхвысокочастотных (СВЧ) импульсов с катодами с алмазным покрытием. Показано, что использование таких катодов позволяет увеличить ток эмиссии и коэффициент усиления СВЧ компрессора.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие многих областей современной микроэлектроники и сильноточной СВЧ электроники связано с разработкой и созданием эффективных источников электронов (катодов) с высокой эмиссионной способностью. Широко используемые в различных СВЧ устройствах термокатоды обычно обеспечивают относительно низкую плотность тока (меньше 10 А/см²), имеют небольшой срок службы при высоких токах эмиссии и требуют дополнительных источников энергии.

Автоэмиссионные и взрывоэмиссионные холодные катоды обладают рядом отличий от термокатодов, они потребляют значительно меньше энергии, работают при низкой температуре, безынерционны и обеспечивают узкий энергетический спектр эмитируемых электронов. Принцип работы холодных катодов основан на явлении автоэлектронной эмиссии, связанной с прохождением электронов через потенциальный барьер на границе твёрдое тело—вакуум под воздействием приложенного электрического поля. Вероятность прохождения потенциального барьера определяется его высотой (работой выхода) и напряжённостью электрического поля. Работа выхода для чистой поверхности зависит от фундаментальных свойств материала и составляет для большинства металлов величину порядка 5 эВ. При этом для достижения необходимых для большинства практических применений токов автоэмиссии требуются электрические поля с напряжённостью порядка 10⁷ В/см. Такие высокие напряжённости обычно достигаются за счёт эффекта усиления электрического поля на острой кромке катода или микроостриях на его поверхности, а плотность тока с одного микроострия достигает 10⁷÷10⁸ А/см² [1].

В настоящее время автоэмиссионные катоды разработаны в основном для слаботочных приборов (широкоформатные дисплеи, диоды Спиндта и т. д.), работающих при низких напряжениях и, соответственно, микронных зазорах между катодом и анодом. В приборах сильноточной СВЧ электроники преимущественно используются взрывоэмиссионные лезвийные металлические или графитовые катоды [2], которые обеспечивают токи в несколько килоампер, но не обладают высокой однородностью эмиссии по поверхности. Расстояние между катодом и анодом в этих приборах достаточно велико, поэтому для инициации электронной эмиссии, приводящей к появлению

* chev@appl.sci-nnov.ru

взрывоэмиссионных плазменных центров, требуются электрические поля в сотни киловольт на сантиметр. Кроме того, эмиссионная способность таких катодов часто падает в результате их распыления и химической деградации даже в условиях высокого вакуума. Поэтому поиск материалов, характеризующихся низким порогом возникновения эмиссии, высокой пространственной однородностью и плотностью эмиссионных токов, является актуальной задачей.

Одним из перспективных материалов, способных понизить напряжение и обеспечить высокие токи эмиссии, могут служить покрытия на основе поликристаллических алмазных плёнок [3–9]. Последние позволяют создать высокую плотность микронеоднородностей с высоким коэффициентом усиления поля на поверхности катода и обладают уникальными физическими свойствами, такими как наличие отрицательного сродства к электрону, высокая теплопроводность и радиационная и химическая стойкость. В последнее время катоды на основе алмазных плёнок активно исследуются в связи с их возможным применением в автоэмиссионных плазменных дисплеях и микроэлектронике [10]. Подавляющее большинство исследований проводится в слаботочном режиме, когда плотность тока относительно невысока (менее 1 А/см^2), межэлектродный зазор составляет несколько микрон, а напряжение между катодом и анодом не превышает нескольких киловольт. При этом плёнки обычно напыляются на кремниевые подложки с относительно низкой проводимостью.

Возможность применения катодов на основе алмазных плёнок в приборах сильноточной СВЧ электроники в настоящее время практически не изучена. В немногочисленных статьях [11–15], посвящённых изучению работы таких катодов в сильноточном режиме, отмечается перспективность использования алмазных покрытий для увеличения плотности тока и снижения порога эмиссии. Так, в работах [11, 12] характеристики катодов на основе алмазных плёнок и нанотрубок исследовались с использованием высоковольтных импульсов с длительностью 100 нс и амплитудой $0,7 \div 1,6 \text{ МВ}$. Плотность тока эмиссии составляла 115 А/см^2 для допированной бором микрокристаллической алмазной плёнки и 160 А/см^2 для широкоапертурного катода на основе нанотрубок. Однако время жизни этих катодов ограничивалось лишь несколькими импульсами. В работе [15] показано, что микро- и нанокристаллические алмазные плёнки позволяют увеличить ток и однородность эмиссии молибденовых катодов в сильноточном режиме. Плотность тока эмиссии в импульсах с длительностью 50 нс и амплитудой 100 кВ достигала 200 А/см^2 .

В данной работе представлены результаты исследования эмиссионных свойств молибденовых катодов с алмазным напылением в сильноточном режиме и зависимости этих свойств от параметров напыления. Эмиссионные характеристики плёнок определялись на основе анализа параметров выходного излучения мощного компрессора СВЧ импульсов с катодами на основе алмазных плёнок.

1. ПРОЦЕСС НАПЫЛЕНИЯ И СТРУКТУРА АЛМАЗНЫХ ПЛЁНОК

Алмазные плёнки напылялись на поверхность молибденовых катодов методом осаждения из газовой фазы (CVD) с помощью плазмохимического реактора на основе непрерывного гиротрона с частотой 30 ГГц и мощностью до 10 кВт [15, 16]. Микроволновый разряд создавался над поверхностью напыляемого катода с помощью двух пересекающихся волновых пучков. Следует отметить, что в отличие от CVD реакторов на основе сверхвысокочастотных резонаторов, использование волновых пучков позволяет осуществлять напыление плёнок на катоды различной формы. Катод представлял собой полый молибденовый цилиндр с внешним диаметром 10 мм и высотой 9 мм со сходящим на конус острым передним краем. Таким образом, эмитирующая поверхность катода имела форму кольца с внешним диаметром 10 мм и шириной 50 мкм. Для напыления использовались газовые смеси $\text{Ar-H}_2\text{-CH}_4$ и $\text{Ar-H}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$ с различным относи-

Таблица 1. Режимы осаждения алмазных плёнок

№ катода	Поток газовой смеси $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4/\text{N}_2$, стандартные кубические сантиметры в минуту	Давление p , торр	Мощность СВЧ излучения $\langle P \rangle$, кВт	Температура смеси T_s , °C	Время осаждения, мин
1	Молибденовый катод без алмазной плёнки				
2	106/50/2/0	200	4,5	900	30
3	106/50/10/0	200	4,5	900	10
4	106/50/5/3	200	4,5	850	30

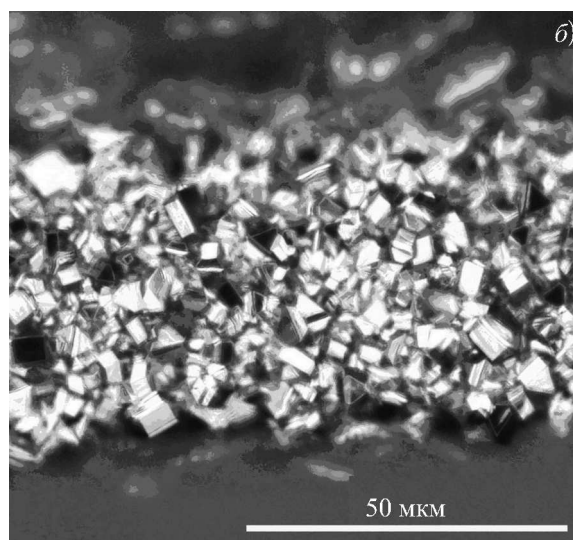
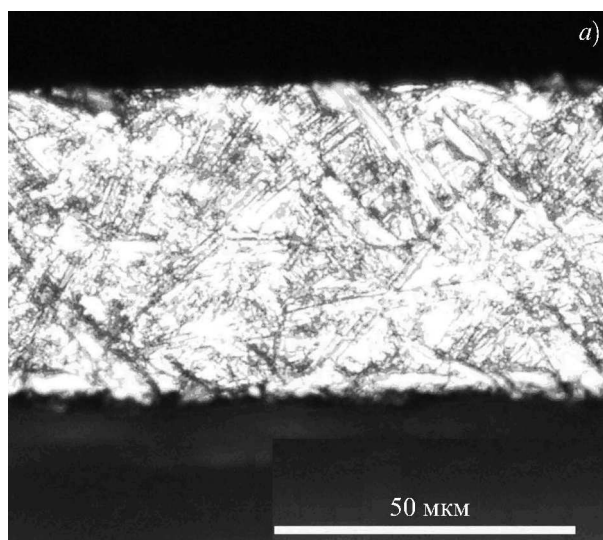
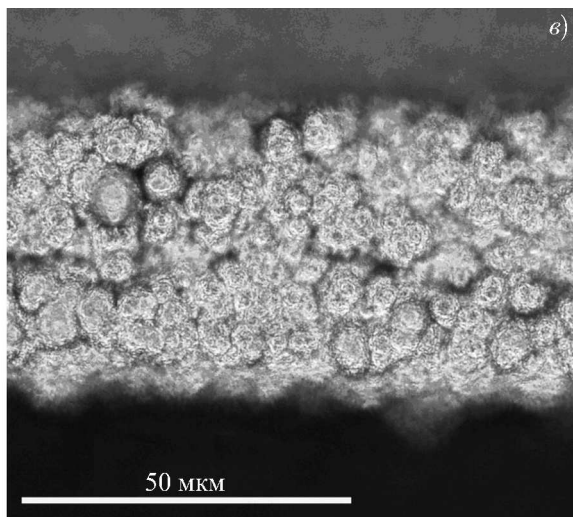


Рис. 1. Структура поверхности острой кромки молибденового катода без напыления (а) и после напыления алмазной плёнки в условиях низкого (б) и высокого (в) содержания метана в газовой смеси



тельным содержанием компонент. Температура катода определялась режимом напыления и изменялась в диапазоне от 600 до 900 °C, давление газовой смеси составляло 200 торр. Для образования центров кристаллизации перед напылением поверхность катода подвергалась механической

обработке алмазным порошком с размером частиц $1 \div 2$ мкм. Следует отметить, что молибден является весьма удобным материалом для нанесения алмазных плёнок, т. к., в отличие от многих переходных металлов, он плохо растворяет углерод. При этом осаждению алмазной плёнки предшествует образование карбида, который способствует росту осаждаемого из газовой фазы алмаза и увеличивает адгезию путём частичного снятия напряжений на границе раздела молибдена и алмаза.

В зависимости от содержания метана и азота в газовой смеси на поверхности молибденовых катодов осаждались микро- или наноалмазные плёнки с различной морфологией кристаллитов и различным соотношением графитовой (sp^2) и алмазной (sp^3) фаз. Толщина напыляемых плёнок составляла $10 \div 15$ мкм. Режимы осаждения алмазных плёнок приведены в табл. 1.

На рис. 1 представлены типичные микрофотографии поверхности алмазных плёнок, выращенных в различных условиях на эмитирующей кромке молибденового катода. Из него видно, что алмазная плёнка, выращенная из газовой фазы с небольшим содержанием метана (рис. 1б), является поликристаллической с размером кристаллитов $2 \div 5$ мкм. При этом в спектре комбинационного рассеяния плёнки наблюдался ярко выраженный пик в области частот 1332 см^{-1} , характерный для алмазной sp^3 -фазы углерода и слабая полоса в окрестности частоты 1550 см^{-1} , связанная с наличием графитовой sp^2 -фазы. Графит обычно располагается в небольшой по объёму области границ между кристаллами. Плёнки, выращенные в газовой смеси с высоким содержанием метана, имеют структуру типа «цветной капусты» (рис. 1в) и существенно меньший размер кристаллитов. Отметим, что их размеры оказываются меньше 1 мкм, т. е. меньше размеров частиц, из которых происходит первоначальный рост. С уменьшением размера кристаллитов увеличивается влияние их границ, что выражается в росте интенсивности полос излучения в окрестности частот $1150, 1350, 1550\text{ см}^{-1}$ рамановского спектра. Добавление в газовую смесь даже небольшого количества азота резко уменьшает размер кристаллитов вплоть до сотни нанометров. При этом морфология плёнки оказывается близкой к изображённой на рис. 1в. Такая структура объясняется созданием дополнительных дефектов на поверхности плёнки вследствие встраивания в неё атомов азота, что ускоряет ренуклеацию. Рамановский спектр такой плёнки имеет два широких пика в окрестности частот 1350 и 1580 см^{-1} , свидетельствующих о том, что она содержит нанокристаллический алмаз и sp^2 -гибридизированный углерод. Как было показано в [15], морфология и структура плёнок существенным образом влияет на их эмиссионные свойства. На рис. 2. представлены типичные интегральные фотографии эмитирующей поверхности катода до и после осаждения алмазной плёнки в момент подачи высоковольтного импульса напряжения с амплитудой 100 кВ и длительностью 50 нс. Фотографии сделаны через медную сетку, играющую роль анода, зазор между электродами был равен 8 мм.

На рис. 2а хорошо видны эмиссионные плазменные центры, возникающие на острой кромке катода вследствие развития взрывной эмиссии. Эмиссия с кромки катода, покрытого алмазной плёнкой (рис. 2б), имеет существенно более однородный характер, а отсутствие ярких плазменных очагов может свидетельствовать о её чисто автоионизационном механизме.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИОННЫХ СВОЙСТВ КАТОДОВ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эмиссионные свойства катодов с алмазным напылением изучались с использованием мощного двухканального компрессора СВЧ импульсов [17, 18] 3-сантиметрового диапазона длин волн. Для переключения такого компрессора из режима накопления в режим вывода энергии (т. е. модуляции добротности) используются резонансные переключатели, управляемые электронным пучком, создаваемым взрывоэмиссионными лезвийными катодами. Схема одного канала ком-

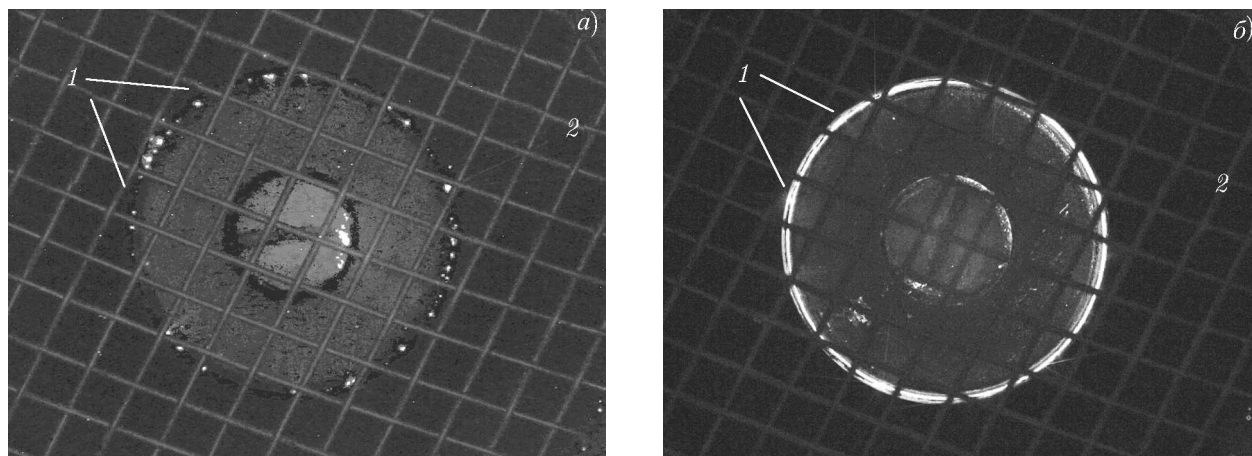


Рис. 2. Интегральная фотография эмитирующей кромки молибденового катода без напыления (а) и катода с алмазной плёнкой (б) при подаче высоковольтного импульса напряжения с амплитудой 100 кВ и длительностью 50 нс: 1 — кромка катода, 2 — анод в виде сетки. Расстояние между анодом и катодом равно 8 мм

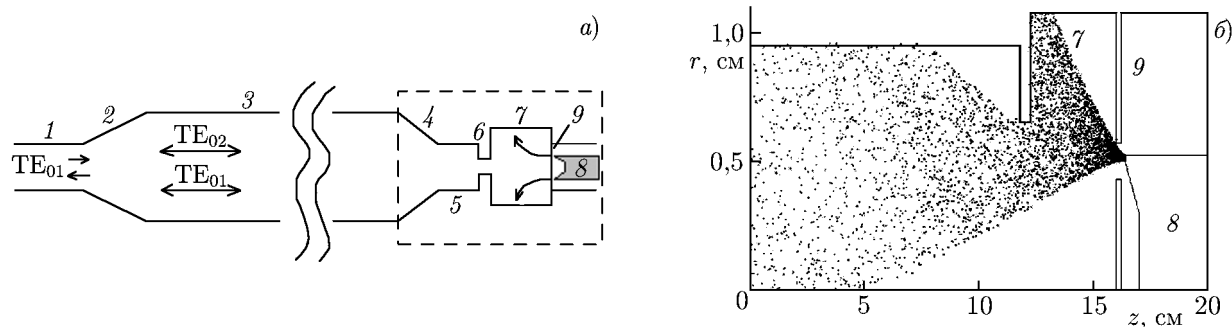


Рис. 3. Панель а — схема одного канала компрессора: 1 — входной волновод для моды TE_{01} , 2 — входной рупор, 3 — накопительный резонатор, 4 — конический рупор, 5 — волноводная секция, 6 — диафрагма, 7 — резонатор переключателя на моде TE_{012} , 8 — катод, 9 — целевой анод. Панель б — пространственное распределение электронов, инжектируемых в резонатор переключателя (расчёт при токе пучка 200 А и напряжении на катоде 100 кВ)

прессора с переключателем на электронном пучке приведена на рис. 3а.

Накопление энергии в компрессоре [18], работающем на частоте 11,4 ГГц, происходит в моде TE_{02} , а вывод накопленной энергии — в виде моды TE_{01} . Усиление потока излучения обеспечивается за счёт резкого увеличения коэффициента связи с нагрузкой при трансформации моды TE_{02} накопительного резонатора 3 в моду TE_{01} выходного тракта 1. Изменение коэффициента трансформации достигается с помощью резонансного переключателя 7, используемого в качестве инвертора фазы. Его работа основана на эффекте изменения фазы отражённой от резонатора переключателя электромагнитной волны в зависимости от того, находится ли резонатор в резонансе с волной или нет. Резонатор выводится из резонанса путём инжекции в него пучка электронов через целевой анод 9, являющийся одновременно задней стенкой резонатора. При увеличении тока пучка растёт и отстройка резонатора от резонансной частоты. При этом сдвиг фазы отражённой волны возрастает и приближается к 180° . Качественные оценки [19] показывают, что при добротности резонатора переключателя $Q = 500$ для сдвига частоты резонатора на полуширину резонансной кривой необходимо инжектировать в переключатель $4 \cdot 10^{10}$ электронов. При

напряжении на катоде 100 кВ это соответствует электронному пучку с током около 120 А. Переключатель рассчитан таким образом, что чем выше расстройка резонатора и сдвиг фазы, тем больше коэффициент переключения между модами и, соответственно, коэффициент усиления компрессора. Поэтому катоды с более высокой эмиссионной способностью должны обеспечивать больший коэффициент усиления. При этом коэффициент усиления по мощности $G = P_{\text{out}}/P_{\text{inc}}$ определяется как отношение мгновенной мощности выходного (сжатого) импульса P_{out} к мгновенной мощности входного импульса P_{inc} .

Для определения зависимости выходных параметров компрессора от эмиссионной способности катодов было проведено численное моделирование его работы при инжекции в него пучка электронов. Расчёт проводился методом конечных разностей во временной области [20] с использованием численного кода KARAT [21]. Предполагалось, что компрессор возбуждается волной TE_{01} на резонансной частоте 11,4 ГГц. После накачки компрессора и установления колебаний в резонаторе переключателя в момент окончания входного импульса в переключатель инжектировался пучок электронов. Полный ток электронного пучка варьировался в процессе расчётов и задавался независимо от напряжения на катоде. В большинстве случаев разность потенциалов между катодом и анодом предполагалась равной 100 кВ. Пространственное распределение электронов, инжектированных в резонатор переключателя через целевой анод, приведено на рис. 3б. Расчёты показали, что от 80 до 100 % эмитированных катодом электронов могут быть инжектированы в резонатор переключателя в зависимости от расстояния между анодом и катодом.

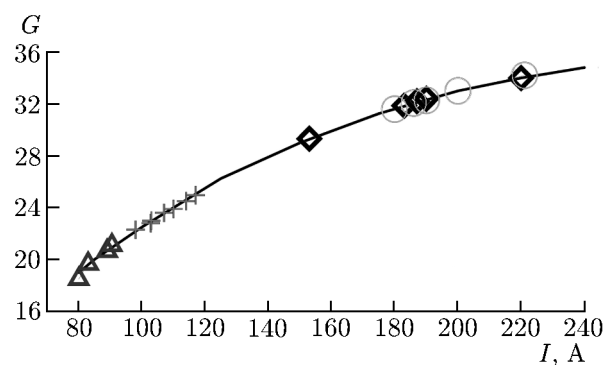


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления излучения по мощности $G = P_{\text{out}}/P_{\text{inc}}$ компрессора от силы тока инжектируемого пучка электронов: сплошная кривая — расчёт, символы — эксперимент для различных катодов: треугольники — катод 1, крестики — катод 2, кружки — катод 3, ромбы — катод 4

Взаимодействие электронного пучка с полем возбуждаемой в резонаторе переключателя электромагнитной волны рассчитывалось методом «крупных частиц» (PIC — particle in cell). В процессе расчётов определялись изменения фазы и коэффициента отражения электромагнитной волны TE_{01} от резонатора переключателя после инжекции в него пучка электронов с различным током. Эти данные использовались для определения коэффициента трансформации моды TE_{02} в моду TE_{01} и, соответственно, коэффициента усиления G компрессора. Расчётная зависимость коэффициента G от тока пучка, определяемого эмиссионной способностью катода, представлена на рис. 4. Из него следует, что увеличение тока эмиссии приводит к возрастанию коэффициента усиления компрессора. Поэтому данная зависимость может быть использована для определения

эмиссионной способности катодов.

В экспериментах компрессор возбуждался с помощью импульсов магникона, работающего на частоте 11,4 ГГц и имеющего выходную мощность $P_{\text{inc}} = 1 \div 8$ МВт и длительность импульса $\tau = 1,4$ мкс. Схема эксперимента была аналогичной приведённой в работе [18]. При подаче на катод высоковольтного импульса с отрицательной полярностью, амплитудой $U = 100$ кВ и длительностью 50 нс пучок электронов инжектировался в резонатор переключателя. Электроны изменяли резонансную частоту резонатора, выводили его из резонанса с входным излучением и, соответственно, изменяли фазу отражённого от резонатора сигнала. При этом коэффициент трансформации моды TE_{02} в моду TE_{01} резко возрастал и накопленная в резонаторе в моде TE_{02} энергия СВЧ электромагнитного поля излучалась через входной рупор в виде моды TE_{01} .

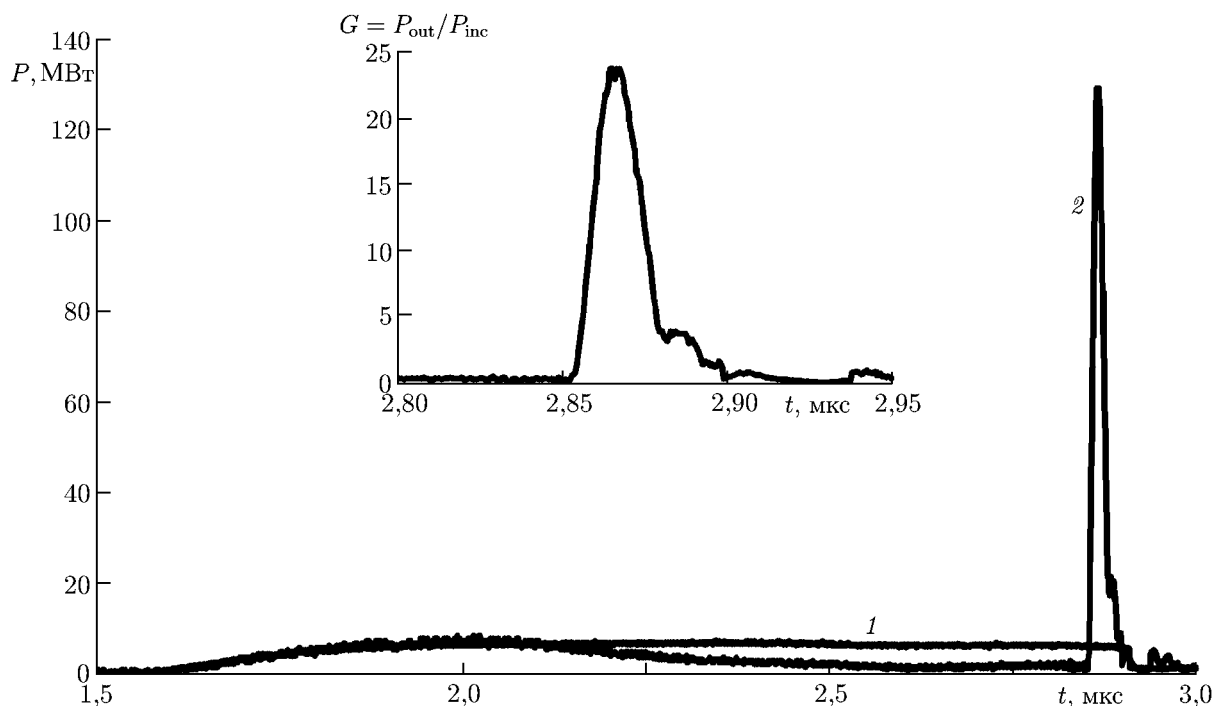


Рис. 5. Характерная осциллограмма сжатого импульса: 1 — мощность входного импульса P_{inc} , 2 — мощность выходного импульса P_{out}

Характерная осциллограмма сжатого импульса приведена на рис. 5.

В эксперименте для исследуемых катодов с помощью направленных ответвителей и калиброванных детекторов измерялась мощность входного, P_{inc} , и сжатого, P_{out} , импульсов. Эти данные использовались для определения коэффициента усиления G и, соответственно, эмиссионной способности используемых катодов. Результаты измерения коэффициента усиления компрессора для различных катодов (см. табл. 1) приведены на рис. 4. Чтобы избежать нелинейного взаимодействия пучка электронов с микроволновым полем резонатора переключателя, измерения проводились при относительно низкой мощности входного излучения $P_{\text{inc}} \leq 3$ МВт. При этом каждая экспериментальная точка на рис. 4 является результатом усреднения по десяти реализациям. Из него следует, что наименьшим током эмиссии (т. е. наименьшим коэффициентом усиления G) по сравнению с другими катодами обладает катод без алмазной плёнки (катод 1). Катод 2, покрытый алмазной плёнкой в газовой смеси с низким содержанием метана, имеет более высокую эмиссионную способность, а наибольший ток пучка достигается для катодов 3 и 4 с плёнками, выращенными в смеси с высоким содержанием метана или добавкой азота. При этом токи эмиссии этих катодов были весьма близки к предельному току используемого генератора высоковольтных импульсов. Однако следует отметить, что в эксперименте после нескольких тысяч импульсов эмиссионная способность катодов с алмазными плёнками снижалась до уровня катода без напыления. Анализ показал, что этот процесс является результатом облетания плёнки с поверхности катода вследствие недостаточно высокой адгезии.

Наблюдаемое возрастание тока эмиссии для мелкозернистых плёнок с высоким содержанием графитовой sp^2 -фазы (катод 3), по-видимому, связано с изменением зонной структуры и увеличением проводимости плёнки. Известно, что в поликристаллических плёнках вблизи поверхности кристаллитов широкозонных полупроводников формируются разрешённые состояния электро-

нов, дискретные уровни энергии которых располагаются в запрещённой зоне. Эти поверхностные состояния сильно влияют на электрические свойства полупроводников в случае более сложной структуры поверхности при уменьшении размера кристаллитов и могут даже изменять тип электропроводности [22]. При большой плотности уровней они объединяются в поверхностные зоны, заполнение которых электронами обуславливает поверхностную проводимость металлического типа. При этом уровень Ферми (а следовательно и работа выхода) определяется свойствами поверхностных уровней энергии на поверхности полупроводника и расположен вблизи них. Все эти процессы существенно влияют на перенос носителей тока к эмиссионным центрам и снижают напряжённость внешнего электрического поля, необходимую для эффективной автоэлектронной эмиссии. Дополнительным фактором может служить уменьшение размера кристаллитов, играющих роль микронеоднородностей на эмитирующей поверхности. Усиление внешнего поля на этих микровыступах способствует возникновению автоэлектронной эмиссии с поверхности плёнки. Таким образом, микро- и нанокристаллы алмаза в гетерофазной углеродной матрице могут служить центрами предпочтительной автоэлектронной эмиссии, обеспечивая более высокую плотность тока при более низком по сравнению с монокристаллическими или дефектными плёнками напряжении между электродами.

Эксперименты показали, что плёнки, допированные азотом (катод 4), также увеличивают эмиссионную способность катодов в сильноточном режиме. Отметим, что в настоящее время нет полного понимания механизма влияния азота на эмиссию электронов. Известно, что добавление азота в газовую смесь способствует росту нано- и ультрананокристаллических алмазных плёнок, обладающих более высокими эмиссионными свойствами по сравнению с микрокристаллическими плёнками [23]. Хотя азот является глубоким донором с уровнем энергии 1,7 эВ ниже зоны проводимости алмаза, предполагается, что он существенно улучшает эмиссионные свойства плёнки вследствие формирования дополнительных электронных состояний на границах кристаллитов [23] или образования смешанных состояний алмаз—графит [24]. Другой возможной причиной увеличения эмиссионного тока может быть наличие у допированных азотом плёнок отрицательного сродства к электрону [25] и, соответственно, уменьшение работы выхода на поверхности плёнки. На эмиссионные свойства допированных азотом плёнок может также существенно влиять формирование в них положительно заряженного слоя, который существенно усиливает внешнее электрическое поле на границе металл—алмаз. Действительно, под воздействием внешнего поля атомы азота в алмазе становятся положительно заряженными (ионизируются) и формируют на переходе алмаз—металл обеднённую электронами область с сильным электрическим полем, увеличивающим эмиссию электронов [26]. В результате эмиссия возрастает при повышении концентрации легирующей примеси.

Кроме того, в последнее время было обнаружено [27, 28], что плёнки, выращенные при достаточно высоком содержании азота, могут включать в себя алмазные зёрна, окружённые несколькими слоями графита. Эти включения обладают высоким коэффициентом усиления электрического поля на поверхности неоднородности и могут играть роль эмиссионных центров. При этом наличие в структуре плёнки диэлектрической фазы в виде алмазных кристаллитов и проводящей в виде алмаз-графитовых зёрен при увеличении доли графитовой фазы приводит к перколяционному переходу диэлектрик—проводник и резкому возрастанию проводимости плёнки [27].

Следует отметить, что упомянутые выше исследования в основном касались определения пороговых полей автоэлектронной эмиссии и проводились при относительно невысоких эмиссионных токах. В то же время представленные в настоящей работе эксперименты показали, что использование алмазных плёнок позволяет улучшить эмиссионные характеристики катодов не только в слаботочном, но и в сильноточном, близком к взрывоэмиссионному, режимах.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена работа катодов на основе алмазных плёнок в составе сильноточного СВЧ устройства. Выполненные исследования показали, что нанесение структурированных алмазных плёнок на поверхность молибденовых катодов позволяет увеличить ток и поверхностную однородность их электронной эмиссии. Было установлено, что на увеличение тока эмиссии существенно влияют допирование плёнки азотом, а также одновременное уменьшение размера кристаллитов алмаза и увеличение содержания в плёнке графитовой sp^2 -фазы при повышении концентрации метана в газовой смеси во время роста плёнки. Использование катодов с алмазными плёнками в мощном компрессоре СВЧ импульсов позволило добиться более эффективной работы переключателя компрессора и увеличить его коэффициент усиления мощности излучения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-08-00990).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г. А. Взрывная электронная эмиссия. М.: Физматлит, 2011.
2. Месяц Г. А., Проскуровский Д. И. Импульсный разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
3. Fundamentals of vacuum microelectronics / Ed. by W. Zhu. New York: Wiley and Sons, 2000.
4. Subramanian K., Kang W. P., Davidson J. L., et al. // *Diamond Relat. Mater.* 2008. V. 17. P. 1 808.
5. Рейх К. В., Эйдельман Е. Д., Дидейкин А. Т., Вуль А. Я. // *Журн. техн. физ.* 2008. Т. 78, вып. 2. С. 119.
6. Lu X., Yang Q., Xiao C., Hirose A. // *Thin Solid Films.* 2008. V. 516. P. 4 217.
7. Geis M. W., Efremow N. N., Krohn K. E., et al. // *Nature.* 1998. V. 393, No. 4. P. 431.
8. Proffitt S. S., Probert S. J., Wichaël M. D., et al. // *Diamond Relat. Mater.* 1999. V. 8. P. 768.
9. Zhirnov V. V., Shenderova O. A., Jaeger D. L., et al. // *Физ. твёрдого тела.* 2004. Т. 46, вып. 4. С. 641.
10. Рахимов А. Т. // *Успехи физ. наук.* 2000. Т. 170. С. 996.
11. Wang B., Xiong Y., Xia L., et al. // *Diamond Relat. Mater.* 2011. V. 20. P. 433.
12. Liao Q., Zhang Y., Xia L., et al. // *J. Phys. D.* 2007. V. 40. P. 6 626.
13. Shen Y., Xia L., Zhang H., et al. // *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams.* 2011. V. 14. Art. no. 104701.
14. Ivanov O., Isaev V., Radishev D., et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011. V. 39, No. 11. P. 2 794.
15. Chernov V. V., Ivanov O. A., Isaev V. A., et al. // *Diamond Relat. Mater.* 2013. V. 37. P. 87.
16. Vikharev A. L., Gorbachev A. M., Kozlov A. V., et al. // *Diamond Relat. Mater.* 2008. V. 17. P. 1 055.
17. Ivanov O. A., Isaev V. A., Lobaev M. A., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2010. V. 97. Art. no. 031501.
18. Ivanov O. A., Lobaev M. A., Vikharev A. L., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2013. V. 110. Art. no. 115002.
19. Ivanov O. A., Isaev V. A., Lobaev M. A., et al. // *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams.* 2011. V. 14. Art. no. 061301.
20. Taflov A. *Advances in computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method.* Boston: Artech House, 1998.
21. Tarakanov V. P. *User's manual for code KARAT.* Springfield: Berkeley Research Associates, Inc., 1992. 127 p.
22. Покровский Я. Е. // *Журн. техн. физ.* 1954. Т. 24, вып. 7. С. 1 229.
23. Zhou D., Krauss A. R., Qin L. C., et al. // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 82, No. 9. P. 4 546.
24. Wu K., Wang E. G., Cao Z. X., et al. // *J. Appl. Phys.* 2000. V. 88, No. 5. P. 2 967.

25. Himpsel F. J., Knapp J. A., van Vechten J. A., et al. // Phys. Rev. B. 1979. V. 20. P. 624.
26. Geis M. W., Efremow N. N., Krohn K. E., et al. // Nature. 1998. V. 393, No. 4. P. 431.
27. Власов И. И., Казюба М. В., Ширяев А. А. и др. // Письма Журн. exper. теорет. физ. 2012. Т. 95, вып. 7. С. 435.
28. Teng K. Y., Chen H. C., Chiang H. Y., et al. // Diamond Relat. Mater. 2012. V. 24. P. 126.

Поступила в редакцию 27 февраля 2014 г.; принята в печать 24 сентября 2014 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF HIGH-CURRENT CATHODES BASED ON DIAMOND FILMS AS ELEMENTS OF HIGH-POWER COMPRESSORS OF MICROWAVE PULSES

O. A. Ivanov, M. A. Lobaev, V. V. Chernov, A. L. Vikharev, A. M. Gorbachev, and V. A. Isaev

We present the results of studying the emissive properties of molybdenum cathodes with deposited diamond films at strong currents, as well as the dependencies of these properties on the deposition regimes and the structure of diamond films. The emissive properties of the films are determined by analyzing the output parameters of a high-power compressor of microwave pulses, which is based on diamond-coated cathodes. It is shown that the use of such cathodes allow one to increase the emission current and the amplification coefficient of the microwave compressor.