

10;11;12

Усиление потока электронов с помощью алмазной мембраны

© С.А. Гаврилов,¹ Н.Н. Дзбановский,² Э.А. Ильичев,¹ П.В. Минаков,² Э.А. Полторацкий,¹
Г.С. Рычков,¹ Н.В. Суетин²

¹ Федеральное государственное унитарное предприятие
„Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина“,
124460 Москва, Россия

² Научно-исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия
e-mail: polt@niifp.ru

(Поступило в Редакцию 20 февраля 2003 г.)

Рассматривается вторичная электронная эмиссия (ВЭЭ) из алмазных пленок, выполненных в виде мембран толщиной 2.5–5 μm . ВЭЭ исследуется в двух режимах: в режиме „на отражение“, когда вторичные электроны выходят с поверхности мембраны, на которую падают первичные электроны, и в режиме „на прострел“, когда вторичные электроны выходят с поверхности, противоположной поверхности, на которую падают первичные электроны. Оценка коэффициента ВЭЭ производится на основе анализа поведения в твердом веществе электронов с энергией 0.1–30 keV. Показано, что в случае „на отражение“ коэффициент ВЭЭ может быть более 100 при энергиях порядка 3 keV, а в случае „на прострел“ он не превышает 5 даже при энергиях 30 keV. Для улучшения эмиссионных свойств мембран при работе „на прострел“ предложен ряд конструкций, в частности пористые мембраны, которые позволяют получить характеристики, близкие к характеристикам при работе „на отражение“. Приведены экспериментальные результаты, согласующиеся с расчетными данными, и описана технология получения алмазных мембран, в том числе и пористых.

Введение

Алмаз и алмазные пленки рассматриваются как перспективные материалы для высокотемпературной и радиационностойкой электроники, а также вакуумной микроэлектроники. Это обусловлено тем, что алмаз обладает целым рядом уникальных физико-химических свойств: высокой химической и радиационной стойкостью, рекордно высокими теплопроводностью и подвижностью носителей. Кроме того, некоторые грани алмаза имеют отрицательное сродство к электрону (ОЭС), т.е. энергия электрона в вакууме оказывается меньше, чем его энергия на дне зоны проводимости, что позволяет беспорогово эмиттировать электроны из зоны проводимости в вакуум [1]. Обнаружение эффекта ОЭС вызвало целую серию исследований, направленных на создание эффективных автоэлектронных эмиттеров на основе алмазных пленок. Сегодня имеется большой экспериментальный материал, который подтверждает наличие электронной эмиссии из поликристаллических алмазных пленок, однако она, скорее всего, не связана с ОЭС, а идет из межкристаллических областей [2]. Основная причина неудач в использовании ОЭС для создания электронных эмиттеров связана с отсутствием электронов в зоне проводимости алмаза, поскольку он имеет большую ширину запрещенной зоны, а эффективной легирующей примеси n -типа до сих пор не обнаружено.

Между тем ОЭС алмаза проявляется в уникально высоком коэффициенте вторичной эмиссии электронов (ВЭЭ) [3]. На основе этого эффекта также можно разработать высокоэффективные вакуумные приборы микроэлектроники.

Основу подобных приборов могут составить поликристаллические алмазные мембраны, способные на основе ВЭЭ усиливать поток электронов, имеющий заданное распределение плотности в плоскости, перпендикулярной направлению распространения электронов.

В литературе имеется достаточно данных, показывающих, что при соответствующих обработках поверхности алмазной пленки могут быть получены весьма высокие значения коэффициента вторичной эмиссии в режиме отражения, достигающие 120 для энергии падающих электронов ~ 3 keV (например, при осаждении на поверхность пленки нанометрового слоя Cs) [4]. К сожалению, все обнадеживающие результаты получены в экспериментах „на отражение“, т.е. когда падающие и вторичные электроны регистрировались по одну и ту же сторону образца. В одной из первых работ, посвященных изучению вторичной эмиссии в алмазных пленках „на прострел“, показано, что достижение высоких коэффициентов ВЭЭ в принципе возможно, однако на практике достигается весьма трудно [5]. Физически этот результат связан, видимо, с рекомбинацией неравновесных электронно-дырочных пар в объеме пленки в процессе их диффузии к тыльной поверхности алмазной пленки.

Для создания приборов с двумерной обработкой изображений типа усилителей электронного потока весьма важно сохранять распределение плотности электронов в плоскости, перпендикулярной направлению движения потока. Это сделать весьма сложно при использовании эффекта размножения электронов в схеме „на отражение“, т.е. проблема создания приборов „на прострел“ остается весьма актуальной. Есть еще ряд проблем, связанных с созданием приборов. В частности, это касается

необходимости получения рисунка на алмазной пленке, вопросов проводимости (легирования) и создания низкоомных контактов. Именно отсутствие низкоомных контактов наряду с указанными выше является одной из причин отсутствия промышленных холодных эмиттеров на основе алмазных пленок.

Данная работа посвящена получению вторичной эмиссии в алмазных пленках с коэффициентом умножения, существенно превосходящем 1 в схеме „на прострел“. В разделе 1 рассмотрена динамика поведения высокоэнергетичных электронов в мембранах и получены оценки коэффициентов вторичной эмиссии в режимах „на отражение“ и „на прострел“. В разделе 2 приведена технология изготовления алмазных пленок и мембран. Раздел 3 посвящен описанию методов исследования и экспериментальным результатам в сплошных алмазных пленках. В разделе 4 проводится обсуждение возможности увеличения вторичной эмиссии в схеме „на прострел“.

1. Динамика поведения электронов высокой энергии в мембране

Основным элементом предполагаемого усилителя электронного потока является мембрана, на поверхность которой падают электроны высокой энергии первичного потока и из приповерхностного слоя которой под действием этих электронов выходят вторичные электроны. Понять работу твердотельного усилителя потока электронов можно на основе анализа динамического поведения электронов в твердом веществе. В приборах обычно используются электроны с энергией 0.1–40 keV. Это случай, когда скорость электрона много меньше скорости света, и тогда вероятная потеря энергии на 1 m пробега для электрона, имеющего энергию E , равна [6]

$$-\frac{dE}{dl} = \frac{Ne^4 Z \ln 2 \ln E_1}{8\pi\epsilon_0^2 E}. \quad (1)$$

Здесь N — число рассеивающих атомов (в m^3), e — заряд электрона, Z — заряд ядра, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, E — энергия электрона, $E_1 = E/\bar{E}$, \bar{E} — средняя работа ионизации. Если электрон вертикально падает на мембрану с высокой энергией, то начальный отрезок пути электрона в мембране можно считать прямолинейным, по крайней мере пока скорость электрона заметно не упадет (в $\sqrt{2}$ раз, как показывают оценки). Анализируя соотношение (1), можно сделать оценку длины общего пути электрона l_m

$$l_m [\mu m] = \alpha \frac{3E_0^2 [\text{keV}]}{2 \ln E_{10}}, \quad E_{10} = \frac{E_0}{\bar{E}},$$

$$\alpha = 6.2 \cdot 10^{-2} \frac{A [\text{g}]}{Z\rho [\text{g/cm}^3]}, \quad (2)$$

где E_0 — начальная энергия электрона, A — атомный вес, ρ — плотность вещества.

Для алмаза $\alpha = 3.54 \cdot 10^{-2}$. Если положить, что средняя энергия ионизации равна второму потенциалу ионизации E_2 (которая [7] для кремния и углерода равна соответственно 16.3 и 24.4 keV), то наибольшая глубина проникновения при $E_0 = 20$ keV в алмазе и кремнии составит соответственно 3.2 и 4.5 μm . Полученные оценки дают неплохое совпадение с результатами работы [8]. При увеличении числа столкновений электрон все больше будет отклоняться от первоначального направления движения. Распределение вероятности рассеяния электрона на угол Θ представляется функцией ошибок [6]

$$p(\Theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\lambda^2} \exp(-\Theta^2/2\lambda^2), \quad \Theta \geq 0, \quad (3)$$

где

$$\lambda = \frac{\beta_0 \sqrt{x} [\mu m]}{\varphi [\text{kV}]}, \quad \beta_0 = 4Z \sqrt{\frac{\rho [\text{g/cm}^3]}{A [\text{g}]}}. \quad (4)$$

Здесь x — толщина слоя, φ — ускоряющее напряжение. Для алмаза $\beta_0 = 13$. Используя (3) и (4) и сделав ряд упрощений для рассматриваемого случая, мы приходим к выводу, что, войдя в мембрану, электрон будет находиться внутри конуса, поверхность которого образуется вращением кривой $y(x)$ вокруг направления начального движения электрона. Кривая $y(x)$ определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{dy}{dx} = \text{tg}(\lambda_0 \Phi^{-1}(\eta)), \quad \lambda_0 = \frac{\beta_0 \sqrt{x} [\mu m]}{E_0 [\text{keV}]}, \quad (5)$$

где $\Phi^{-1}(\eta)$ — функция, обратная $\Phi(x)$, $\Phi(x)$ — интеграл вероятности, η — задаваемая вероятность нахождения электрона внутри конуса (обычно полагается $\eta \approx 0.7-0.8$). Длина кривой $y(x)$ приблизительно равна l_m . Уменьшая η до 0, мы получим непрерывную последовательность конусов, границы оснований которых лежат на выпуклой поверхности, закрывающей исходный конус. Исходный конус (полученный при $\eta = 0.7-0.8$) и выпуклая поверхность ограничивают пространство, в котором первичный электрон рождает большинство вторичных электронов. Проведенные оценки показали, что в целях упрощения дальнейшего анализа конус можно заменить сферой радиуса $l_m/3$, центр которой расположен от поверхности мембраны на расстоянии $2l_m/3$. В этой сфере при $\eta = 0.7-0.8$ будет находиться приблизительно половина всех вторичных электронов. Для получения максимального коэффициента усиления необходимо, чтобы наибольшее число вторичных электронов рождалось по возможности ближе к поверхности, с которой электроны эмиттируются. Отсюда ясно, что в случае работы „на прострел“ толщина мембраны не должна превышать l_m , чтобы вторичные электроны могли подойти за счет диффузии или дрейфа к поверхности и, преодолев барьер (если он есть), выйти в вакуум. Рассмотрим подробнее динамику поведения вторичных электронов. Вторичный электрон рождается вместе с дыркой. Время рекомбинации электрона и дырки в алмазе составляет $\tau_n = 10^{-9}-10^{-8}$ s. Это значит, что за

время τ_n необходимо вывести электроны из мембраны в вакуум. Если внутреннее поле отсутствует, то поверхности могут достичь только электроны, находящиеся в приповерхностном слое толщиной, приблизительно равной диффузионной длине электронов L_n . Для алмазных пленок подвижность μ_n составляет $0.1-1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, а время жизни $10^{-9}-10^{-8} \text{ s}$. Поэтому $0.016 \mu\text{m} \leq L_n \leq 0.16 \mu\text{m}$. Отсюда следует, что в случае отсутствия внутреннего поля и $l_m \gg L_n$ эмиттирующая поверхность должна проходить рядом с центром рассмотренной выше сферы и, следовательно, толщину мембраны нужно выбирать приблизительно равной $2l_m/3$. Полагая далее, что вторичные электроны распределены равномерно в шаре и толщина h мембраны равна $2l_m/3$ для коэффициента усиления K_D в случае „на прострел“, получим следующее соотношение: $K_D \approx 3L_n E_0 / 4h\bar{E}$. При $h = 3 \mu\text{m}$, $E_0 = 20 \text{ keV}$ для лучших пленок с $L_n = 0.16 \mu\text{m}$ получим, что K_D не превысит значение 33, а для обычных пленок с $L_n = 0.016 \mu\text{m}$ коэффициент K_D будет менее 3.3. В то же время, если собирать вторичные электроны с поверхности, на которую падают первичные электроны, для коэффициента усиления „на отражение“ можно получить следующую оценку: $K_D \approx E_0 \min(3L_n/2l_m, 1) / \bar{E}$, которая для энергии электрона, существенно меньшей, чем это требуется в случае „на прострел“, дает значительно более высокие значения K_D . Так, при $E_0 = 3 \text{ keV}$ для лучших пленок получаем, что K_0 может достигать значений 120, причем даже для обычных пленок K_D продолжает сохранять большие значения, а достигающие 30 — при энергиях не более 3 keV. Важным преимуществом работы „на отражение“ является то, что при этом нет принципиальных ограничений на толщину мембраны.

2. Технология изготовления мембран на основе алмазных пленок

В соответствии со сделанными выше оценками для работы „на прострел“ с пленками толщиной $3-4 \mu\text{m}$ требуется напряжение вплоть до 30 kV, причем алмазные пленки необходимо было выполнить в виде сплошных или пористых мембран. Обсуждаемые выше мембраны формируются на поверхности кремниевой подложки. В настоящей работе предложен такой способ формирования, который позволяет осуществить также локальную инициацию зарождения и роста алмазной пленки на поверхности кремния, покрытого фоторезистом, содержащим нанодисперсные частицы алмаза. В качестве подложки использовались пластины монокристаллического кремния ориентации (100), легированные фосфором, с удельным сопротивлением $2.5-4.5 \Omega \cdot \text{cm}$. Перед формированием алмазной пленки пластины подвергали стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. Затем на поверхность пластины центрифугированием наносили пленку фоторезиста, содержащего нанодисперсный алмазный порошок. Средний размер частиц алмаза составлял менее $0.1 \mu\text{m}$. Объемное содержание алмазного порошка

в фоторезисте составляло $10-50\%$. После высушивания при 80°C в течение 10 min и экспонирования резиста излучением ртутной лампы фоторезист проявлялся в 0.5% водном растворе КОН. В случае изготовления сплошных пленок операции экспонирования и проявления не проводили. Алмазные пленки получали методом газофазного осаждения (ГФО) с активацией сверхвысокочастотной (СВЧ) плазмой. Процесс осаждения состоит из ряда последовательных операций, представленных ниже.

На этапе подготовки производится откачка резонатора до давления 10^3 Pa , затем реактор заполняется водородом до давления $5-6 \cdot 10^3 \text{ Pa}$. Скорость потока водорода при этом составляет 10 литров в час.

Перед процессом осаждения алмазной пленки поверхность образца очищается от остатков органических загрязнений. Для этого образец выдерживается в водородной плазме около 15 min при давлении $5-6 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ и температуре $650-700^\circ\text{C}$.

Процесс отжига образца плавно переводится в фазу осаждения пленки. Качественные алмазные пленки получаются при следующих условиях: мощность СВЧ $1-2 \text{ kW}$, давление в реакторе $9-10 \cdot 10^3 \text{ Pa}$, температура образца $750-850^\circ\text{C}$, содержание паров этилового спирта относительно водорода $10-15\%$. Для легированных алмазных пленок условия приблизительно те же, но вместо этилового спирта в испаритель заливается смесь борного спирта с триметилборатом. Процентное содержание триметилбората зависит от необходимой степени легирования алмазной пленки и обычно составляет $0.2-0.8\%$.

После осаждения алмазной пленки образец еще раз подвергается процессу отжига. Время и условия отжига близки к условиям предварительного отжига.

После формирования алмазной пленки пластину покрывали химически инертным материалом. При этом на обратной стороне пластины оставляли незащищенную область, которая определяла размеры создаваемой мембраны. Далее осуществляли химическое растворение кремния в растворе $\text{HF:HNO}_3 = 2:1$ (объемные доли) в течение 60 min до появления алмазной пленки. Контроль осуществлялся с помощью оптического микроскопа. На заключительной стадии защитную маску растворяли в кипящем растворе трихлорэтилена и осуществляли окончательную очистку структуры в парах изопропилового спирта в течение 10 min.

3. Вторичная электронная эмиссия в сплошных пленках

1) Измерительный стенд и методики исследования электрофизических свойств пленок. Измерительный стенд создан на основе растрового электронного микроскопа („CamScan“) [9] и содержит: электронную пушку с системой электромагнитных линз, позволяющих формировать на поверхности пленки коллинеарный пучок электронов

диаметром менее 1000 \AA и сканировать поверхность площадью $5 \times 5 - 1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ с частотой $0 - 100 \text{ Hz}$ при энергиях пучка $0.5 - 30.0 \text{ keV}$; держатель образца (манипулятор), позволяющий изменять его положение в пространстве относительно пучка электронов; контактирующее устройство, коммутатор и источники питания, осуществляющие выбор режима измерений и подачу на изучаемый объект электрического потенциала в диапазоне $0 - 1500 \text{ V}$; систему напыления Cs, включающую испаритель Cs и источник питания; двухкаскадный дифференциальный усилитель токов $10^{-12} - 10^{-7} \text{ A}$ в диапазоне частот $0 - 10^2 \text{ Hz}$; регистрирующую и отображающую системы, включающие электрометрический усилитель, цифровой вольтметр, графопостроитель, осциллограф и запоминающий осциллограф.

Предварительные исследования поликристаллических алмазных пленок, графитовых и аморфных углеродных пленок показали, что в отличие от материалов, предназначенных для холодных катодов, заметная вторичная электронная эмиссия наблюдается в том случае, когда в пленках в основном реализуются sp^3 -связи. Этим обусловлен выбор ГФО метода получения алмазных пленок. Фазовый состав полученных пленок подтвержден методами рамановской спектроскопии (доминируют sp^3 -связи) и дифракции электронов в просвечивающем электронном микроскопе (микрофазовый анализ). Для уменьшения в процессе измерений эффектов зарядки пленки при выращивании легировались бором. Холловские измерения свободных алмазных пленок показали, что легирование бором позволяло получить концентрацию дырок до $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. При этом подвижность свободных носителей не превышала $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

2) Измерение вторичной эмиссии в схемах „на отражение“ и „на прострел“. Типичные зависимости коэффициентов вторичной эмиссии в схемах „на отражение“ и „на прострел“ от энергии первичных электронов для сплошных алмазных пленок представлены на рис. 1 и 2. Под коэффициентом вторичной эмиссии (K_D) понималось отношение тока вторичных электронов к току первичных электронов, измеряемых с помощью цилиндра Фарадея. Ток вторичных электронов мог включать в себя и отраженные электроны при упругом и неупругом рассеянии.

Как правило, максимум K_D в схеме „на отражение“ для пленок, не подвергавшихся дополнительной обработке, наблюдался (рис. 1) при энергиях первичных электронов в районе $800 - 900 \text{ eV}$. При этом величина K_D лежала в диапазоне $5 - 20$ и сильно зависела от состояния поверхности мембраны.

В схеме „на прострел“ максимум K_D сдвигается в область $25 - 35 \text{ keV}$, а его величина лежит в интервале $2 - 3$ и также зависит от состояния поверхности. Эти результаты были получены для случая измерения выхода вторичных электронов с лицевой стороны пленки, т.е. со стороны, не примыкающей к кремниевой подложке в процессе формирования пленки. В случае использования для инъекции обратной поверхности коэффициенты вторичной эмиссии были на порядок ниже, что обусловлено

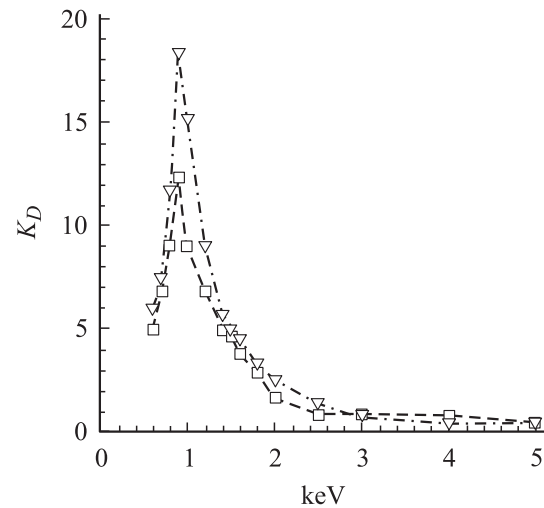


Рис. 1. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов в режиме „на отражение“ для двух образцов.

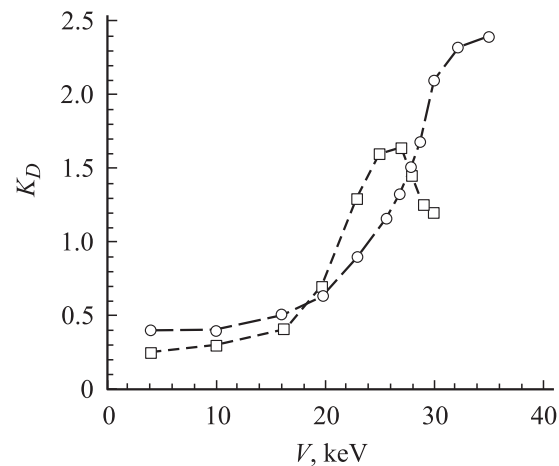


Рис. 2. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов в режиме „на прострел“ для мембраны толщиной $2.5 \mu\text{m}$ (квадратики) и $5 \mu\text{m}$ (кружки).

существенно большим количеством дефектов и межкристаллических границ этой поверхности. Этот факт еще раз подтверждает принципиальное значение механизмов транспорта электронов к поверхности мембраны.

Влияние состояния поверхности на выход вторичных электронов изучалось с помощью воздействия дополнительного отжига и цезирования поверхности. Часть алмазных пленок после выращивания подвергалась дополнительной гидрогенизации поверхности посредством отжига образца в среде H_2 . Отжиг в вакууме таких образцов при 700°C приводил к уменьшению K_D и отрицательный эффект накапливался при последующих отжигах, что, скорее всего, связано с дегидрогенизацией поверхности алмаза. Эти результаты хорошо согласуются с известными литературными данными [10].

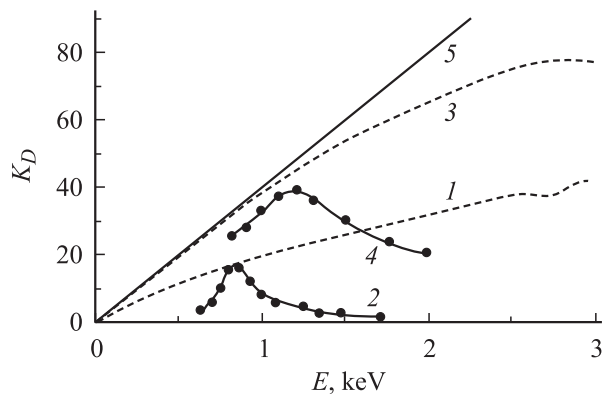


Рис. 3. Сравнение результатов настоящей работы с данными работы [10]: 1, 3 — соответственно гидрогенизированная и цезированные пленки из работы [10]; 2, 4 — гидрогенизированная и цезированная исследуемые мембраны; 5 — теоретическая кривая, раздел 1.

Цезирование поверхности алмазных пленок в свою очередь увеличивало выход вторичных электронов гидрогенизированных образцов в 2–3 раза.

3) Обсуждение результатов. Сравнение полученных экспериментальных результатов, а также результатов других авторов с моделью (раздел 1) показывает, что эта модель дает возможность оценить динамику поведения вторичных электронов. На рис. 3 представлены зависимости K_D от энергии первичных электронов из работы [10] и наши данные для схемы „на отражение“. Пикообразный вид наших кривых говорит о том, что в максимуме глубина проникновения первичных электронов примерно равна диффузионной длине, а сдвиг максимума по шкале энергий при цезировании в сторону увеличения свидетельствует о снижении работы выхода по сравнению с гидрогенизированными пленками.

Поскольку величины K_D наших пленок и пленок работы [10] не сильно отличаются друг от друга при энергиях первичных электронов до 1 keV, то можно сказать, что состояния поверхностей также не сильно различаются. Различия при энергиях свыше 1 keV можно, по-видимому, объяснить тем, что образцы работы [10] имеют большие (примерно в 3 раза) диффузионные длины, что обеспечивает доставку к поверхности вторичных электронов с большей глубины. Это предположение представляется правдоподобным, так как пленки работы [10] имели толщину $\sim 20 \mu\text{m}$ и соответственно больший размер кристаллических зерен по сравнению с нашими пленками (3–5 μm). Именно с меньшим влиянием межзерных границ, по нашему мнению, связан наблюдаемый линейный рост K_D до больших энергий монокристаллических образцов, чем в поликристаллических пленках [10].

Значения K_D в схеме „на прострел“ значительно меньше по величине и, как показывают оценки в разделе 1, определяются малой эффективностью доставки вторичных электронов к поверхности с помощью диффузионного механизма.

4. Возможности увеличения вторичной эмиссии в схеме „на прострел“

1) Вторичная эмиссия в сплошных мембранах при наличии тянущего поля. Мы проанализировали случай, когда поле внутри мембраны отсутствовало. Создать поле в мембране можно с помощью внешнего электрода, роль которого может играть экран, с помощью которого происходит визуальная регистрация усиленного электронного потока. Рассмотрим нелегированную алмазную пленку. В нелегированных алмазных структурах можно полагать, что поле не зависит от координат. Используя соответствующее уравнение непрерывности и считая, что электроны рождаются равномерно по толщине пленки со скоростью k , получаем распределение электронов в виде

$$n = k\tau_n(1 - \exp(-x/\mu_n E_s \tau_n)), \quad (6)$$

где E_s — напряженность поля, создаваемого внешним электродом, на который подается напряжение V_e . Координатная ось Ox перпендикулярна плоскости пленки и ее начало находится на поверхности, на которую падают первичные электроны. Для практического отсутствия рекомбинации электронов достаточно, чтобы

$$\frac{h}{\mu_n \tau_n} \ll E_s, \quad (7)$$

где h — толщина мембраны, тогда $n \approx kx/\mu_n E_s$.

Естественно, что (6) справедливо, если можно пренебречь наличием неравновесных носителей, а это справедливо, если выполняется (7), и на границах пленки подвижные носители заряда эффективно удаляются. Для электронов это справедливо из-за отрицательного электронного сродства (они свободно уходят в вакуум). Для удаления дырок следует у поверхности, куда подходят дырки, создать для них хороший омический контакт, который можно получить формированием на поверхности мембраны тонкого слоя кремния p^+ -типа. Причем концентрация равновесных дырок p^+ должна многократно превосходить концентрацию неравновесных дырок p в алмазе. Если внешний электрод находится на расстоянии d_e от поверхности мембраны, то

$$E_s = \frac{V_e}{(h + d_e \epsilon)}, \quad (8)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая постоянная алмаза.

Поскольку $\epsilon d_e \gg h$, то условие (7) можно переписать как

$$V_e \gg \frac{\epsilon h d_e}{\mu_n \tau_n}. \quad (9)$$

При $\mu_n = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\tau_n = 10^{-8} \text{ s}$, $h = 2 \mu\text{m}$, $d_e = 1 \text{ mm}$, $\epsilon = 4.5$ необходимо, чтобы $V_e \gg 10^4 \text{ V}$. Такие напряжения в реальных устройствах недопустимы. Поэтому использовать экран как электрод для создания соответствующего поля в мембране нельзя и необходимо

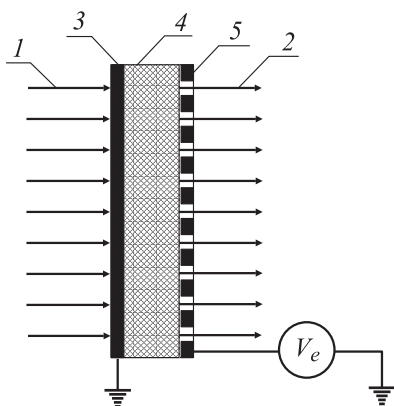


Рис. 4. Оптимизированная конструкция мембраны для использования в режиме „на прострел“: 1, 2 — соответственно падающий и выходящий потоки электронов; 3 — высоколегированный тонкий слой кремния p^+ -типа; 4 — алмазная мембрана; 5 — металлическая сетка, нанесенная на поверхность мембраны.

располагать ускоряющий электрод в непосредственной близости от мембраны ($d_e \leq 10 \mu\text{m}$). Оптимальная конструкция усилителя электронного потока получается, если электрод сформировать на поверхности мембраны в виде сетки, не снижающей разрешающей способности усилителя (рис. 4). Тогда достаточно выполнить условие $V_e \gg h^2/\mu_n\tau_n$. При $\mu_n = 1 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$, $\tau_n = 10^{-8} \text{ s}$, $h = 2 \mu\text{m}$ получим, что $V_e \gg 4 \text{ V}$. Это условие легко выполняется. В качестве электрода можно использовать также тонкий слой ($\sim 0.2\text{--}0.5 \mu\text{m}$) p^+ -алмаза. Экспериментальная реализация этой структуры связана с решением вопросов планаризации поверхности алмазной пленки и созданием качественных омических контактов.

2) Вторичная эмиссия в пористых мембранах. Другим возможным вариантом увеличения вторичной эмиссии является вариант, связанный с использованием пористых мембран. В этом случае вторичные электроны, выходящие через поверхность как в случае схемы „на отражение“, за счет внешнего поля переводятся через поры на противоположную поверхность. При условии, что энергия вторичных электронов мала, электроны могут „втгиваться“ в поры мембраны. Конечно, коэффициент умножения K_n будет несколько меньше, чем в схеме „на отражение“, так как часть первичных электронов проходит через поры и не принимает участия в рождении вторичных электронов. В этом случае $K_n = (1 - S_n/S)K_D$, где S_n и S — общая площадь, занимаемая порами, и рабочая площадь мембраны соответственно; K_D — коэффициент вторичной эмиссии, получаемый в режиме „на отражение“.

Для экспериментальной проверки этой идеи нами сделаны оценки энергии вторичных электронов и изготовлены пористые мембраны. Непосредственные измерения показали, что энергия вторичных электронов не превышает 3–5 eV.

По технологии, описанной в разделе 2, нами были изготовлены пористые алмазные мембраны с порами размером $8 \mu\text{m}$ и расстоянием между ними $8 \mu\text{m}$ (рис. 5). На рис. 6 представлены зависимости коэффициентов вторичной эмиссии на одном и том же образце пористой мембраны, позволяющем реализовать обе схемы „на отражение“ и „на прострел“ во всем диапазоне энергий. В отличие от рис. 2 здесь наблюдаются 2 пика, соответствующие пикам как в схеме „на отражение“, так и в схеме „на прострел“. Увеличение K_D в схеме „на прострел“, возможно, связано с дополнительным размножением электронов в порах, однако этот вопрос требует дальнейшего исследования.

Предложенная конструкция имеет весьма серьезные практические применения. Она существенно уменьшает зависимость коэффициента усиления от толщины мембраны, позволяет работать в схеме „на прострел“ с малыми энергиями первичных электронов, увеличивает

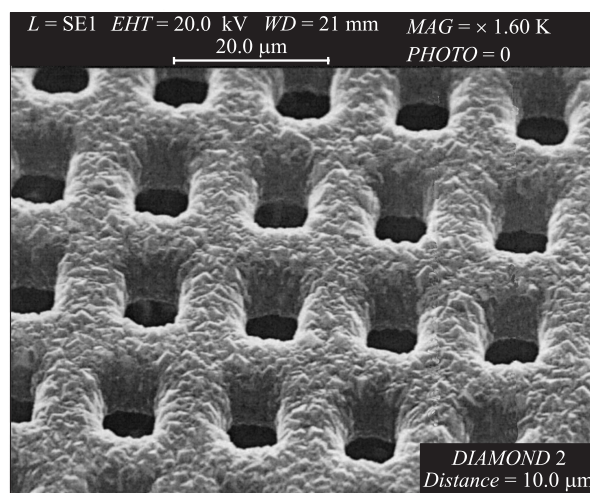


Рис. 5. Изображение в растровом электронном микроскопе пористой алмазной пленки.

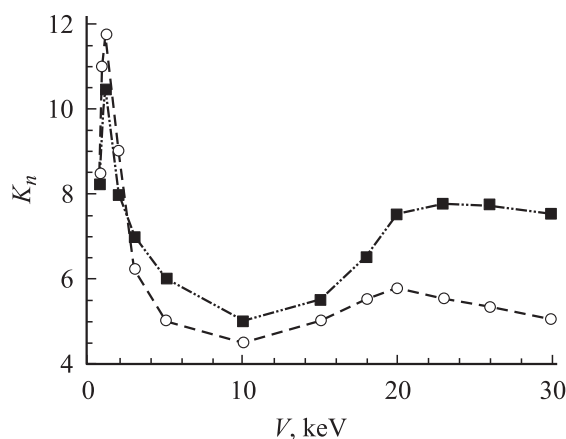


Рис. 6. Зависимость коэффициента ВЭЭ от энергии первичных электронов для пористой пленки в режимах „на отражение“ (кружки) и „на прострел“ (квадратики).

механическую прочность мембран, снимая напряжения, возникающие при росте алмазной пленки на кремниевой подложке.

Заключение

Для алмазных поликристаллических мембран, легированных бором, впервые экспериментально получены коэффициенты вторичной эмиссии, значительно больше единицы в схеме „на прострел“. Исследовано влияние обработки эмиттирующей поверхности (цезирование, гидрогенизация, отжиг) на величину коэффициента ВЭЭ. Показано, что размер и структура кристаллитов имеют принципиальное значение для достижения высоких коэффициентов ВЭЭ. Предложена модель поведения вторичных электронов, удовлетворительно описывающая экспериментальные результаты. Разработана и впервые экспериментально реализована схема „на прострел“, при которой используется пористая мембрана, позволяющая эффективно выводить вторичные электроны, рожденные на лицевой стороне, на противоположную сторону мембраны.

Список литературы

- [1] *Himpsel F.J., Knapp J.A., Van Vechten J.A.* et al. // Phys. Rev. B. 1979. Vol. 20. P. 624.
- [2] *Rakhimon A.T., Suetin N.V., Soldatov E.S.* et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2000. Vol. 18 (1). January / February. P. 76–81.
- [3] *Mearini G.T., Krainsky I.L., Dayton J.A.* // Surface and Interface Analysis. 1994. Vol. 21. P. 138.
- [4] *Mearin G.T., Krainsky I.L., Dayton J.A.* et al. // J. Appl. Phys. Lett. 1995. Vol. 66. N 2. P. 242.
- [5] *Dzbanovsky N.N., Minakov P.A., Pal A.F.* et al. // 3rd IEEE Intern. Vacuum Sources Conf Orlando (Florida), 2000. P. 33.
- [6] *Эберт Г.* Краткий справочник по физике. М., 1963. 552 с.
- [7] *Эткинс П.* Кванты. Справочник концепций. М.: Мир, 1977. 471 с.
- [8] *Evehart T.E., Hoff P.H.* // J. Appl. Phys. 1971. Vol. 42. P. 5837.
- [9] *Dzbanovsky N.N., Minakov P.A., Pal A.F.* et al. // Intern. Topical Meeting on Field Electron Emission from Carbon Materials. Moscow.
- [10] *Yater J.E., Shih A., Abrams R.H.* // J. Vac. Sci. Technol. A. 1998. Vol.16 (3). May / June. P. 913–919.