

ЭЛЕКТРОННАЯ И ИОННАЯ ЭМИССИЯ

УДК 537.533.2,621.387

СТАБИЛИЗАЦИЯ АВТО- И ФОТОЭМИССИИ ПЛАНАРНОЙ СТРУКТУРЫ С НАНОРАЗМЕРНОЙ ПЛЕНКОЙ АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА

© 2019 г. А. Н. Якунин^{1, *}, Н. П. Абаньшин^{1, 2}, Ю. А. Аветисян¹, Г. Г. Акчурун^{1, 3},
Г. Г. Акчурун (мл.)^{1, 3}, А. П. Логинов², С. П. Морев^{4, 5}, Д. С. Мосияш²

¹Институт проблем точной механики и управления РАН,
Российская Федерация, 410028 Саратов, ул. Рабочая, 24

²ООО “Волга-Свет”,

Российская Федерация, 410033, Саратов, просп. им. 50 лет Октября, 101

³Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
Российская Федерация, 410012 Саратов, ул. Астраханская, 83

⁴НПП “Торий”,

Российская Федерация, 117393 Москва, ул. Обручева, 52

⁵Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Российская Федерация, 115409 Москва, Каширское ш., 31

*E-mail: anyakunin@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2017 г.

После доработки 14.11.2017 г.

Принята к публикации 29.11.2017 г.

Проведен анализ возможных механизмов повышения стабильности автоэмиссии и туннельной фотоэмиссии планарной лезвийной структуры при покрытии эмиттера наноразмерной диэлектрической пленкой алмазоподобного углерода (АПУ). Построена модель и теоретически исследованы особенности формирования распределенной зоны локализации поля на поверхности АПУ в структуре – зоны с плавным максимумом напряженности электростатического поля. Показано, что пленка АПУ толщиной 20 нм на молибденовом лезвии (Мо-лезвии) увеличивает площадь зоны эмиссии в 15 раз по сравнению с Мо-лезвием без покрытия. Достигнуто повышение долговечности более чем в 50 раз (до 8700 ч) эмиссионной структуры с пленкой АПУ в режиме длинных импульсов (320 мкс) со скважностью 10 и средней плотностью тока полевой эмиссии не ниже 30 мА/см². Продемонстрировано повышение фоточувствительности структуры с пленкой АПУ.

DOI: 10.1134/S0033849419010133

ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения надежности и долговременной стабильности автоэмиссионных структур с высокой плотностью тока имеет первостепенную значимость при создании новых поколений современных приборов вакуумной электроники [1, 2] – генераторов и усилителей СВЧ с рабочим диапазоном частот вплоть до терагерцового. Туннельный характер транспорта электронов из материала полевых эмиттеров в вакуум делает их привлекательными также для развития широкополосных вакуумных фотосенсоров [3] с возможностью динамической настройки спектральной чувствительности. Баллистический перенос электронов в промежутке “катод–анод” с экстремальной напряженностью электрического поля, а также малое время реакции на оптический сигнал являются залогом высокого быстродействия таких приборов. Другими важными потребителями свойствами приборов являются низкий уровень модулирующих потенциалов и способность функционирования в условиях технического вакуума (при давлении на уровне 10⁻⁵ Па). На практике это позволяет существенно уменьшить

массу источников питания, снизить стоимость приборов вакуумной электроники и фотоники. Противоречивость перечисленных требований затрудняет задачу их одновременного удовлетворения.

Из анализа классического уравнения Фаулера–Нордгейма следует, что повышение напряженности поля приводит к экспоненциальному росту плотности тока полевой эмиссии (ПЭ). Неоднородность поверхности эмиттера (в виде острий катодов Спиндта, лезвий, массивов нанотрубок и др. [1–6]) вызывает локализацию зон интенсивной ПЭ. В этих зонах происходит локальное тепловыделение за счет джоулевого нагрева и/или эффекта Ноттингема.

Известны различные схемы построения элементарных ячеек для массивов с ПЭ, среди которых можно выделить некоторые многообещающие – со средней плотностью тока J ПЭ не ниже десятков миллиампер на 1 см². Структура с гейт-электродом представляет собой эмиттер [4] в виде острия из молибдена высотой 0.8...1.8 мкм и гейт-электродом диаметром 0.8 мкм, поперечные размеры ячейки составляют 4 мкм, разность потенци-

алов между гейтом и эмиттером $U_g = 300$ В, ПЭ-ток с острия достигает 1 мА. В данной конструкции используется свойство ограничения тока ПЭ собственным сопротивлением острия, которое дополнительно растет с нагревом. Эта идея с ограничителем тока получила развитие в конструкции, описанной в [5], в которой столбчатая структура из кремния (далее – Si-структура) с высоким аспектным отношением (200 нм диаметром и 10 мкм высотой) внедрена в диэлектрическую матрицу, апертура гейта имеет диаметр 350 нм, поперечные размеры ячейки уменьшены до 1 мкм, разность потенциалов между гейтом и эмиттером 80 В, ток единичного Si-острия нанопровода достигает 1 мкм. В работе [6] предложена конструкция ячейки, в которой массив углеродных нанотрубок (CNT) связан с отдельной колонной кристаллического кремния (Si), которая действует как нелинейное балластное электрическое сопротивление. Поперечные размеры ячейки составили 15 мкм, рабочее напряжение 20 В, ток кластера CNT на колонне – 5.6 мкА. Аналогичное решение, но с формированием пирамидального нанодiamondного острия на вершине балластного 140-килоомного сопротивления в виде Si-стержня, предложено в [7]. В [8] описывается технология выращивания наноразмерного кремниевого сопротивления на вершине собственно эмиттирующего острия большего размера, обеспечивается устойчивая работа эмиттера с плотностью тока ПЭ 24.9 мА/см² и напряжением 94 В. Существенным ограничивающим фактором таких структур является нелинейное возрастание уровня выделяющейся тепловой мощности в балластных сопротивлениях вместе с ростом плотности тока ПЭ.

В некоторых конструкциях [9, 10] для упрощения вместо индивидуального гейт-электрода для отдельного кластера используется единый “вытягивающий” электрод с потенциалом U . Это позволяет использовать острия с увеличенным характерным размером (масштаб может достигать нескольких десятков микрон). Одновременно растет и U – до уровня нескольких единиц и даже десятков киловольт (например, в конструкции [9] U достигает 6 кВ, а в углеродной структуре “хвостобразного” типа [10] $U = 55$ кВ. Структура [10] обеспечивает стабильную работу эмиттера в течение 1080 ч при плотности тока ПЭ 102 мА/см², но в режиме постоянной откачки для создания высокой степени вакуума. Следует отметить как положительное тот факт, что требования к разбросу размеров острий в конструкциях такого типа в некоторой степени ослабляются, становятся менее строгими.

1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [11, 12] описана планарная структура с гейт-электродом (рис. 1). К основным особенностям структуры следует отнести следующие:

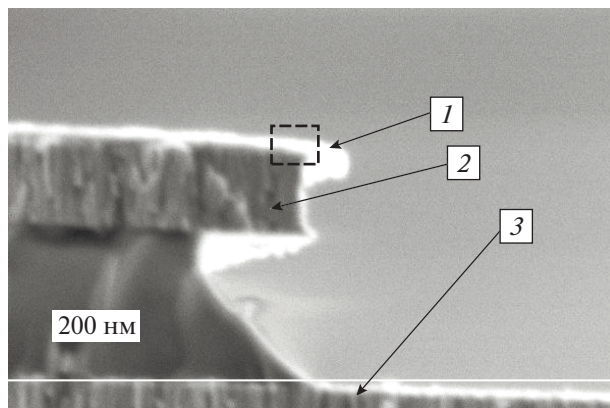


Рис. 1. Планарная структура с Mo лезвием, покрытым пленкой АПУ: 1 – пленка АПУ; 2 – молибденовое лезвие; 3 – молибденовый гейт-электрод; электроды 2 и 3 электрически изолированы друг от друга слоем SiO₂.

– формирование композитного лезвийного эмиттера в виде относительно массивного и высокотеплопроводного основания из молибдена толщиной 300...400 нм, на котором методом PECVD высажена пленка гидрогенизированного АПУ (см. рис. 1, позиции 2 и 1) толщиной 20 нм;

– изготовление гейт-электрода 3 так, чтобы плоскость его поверхности была расположена на расстоянии 600...700 нм от плоскости поверхности пленки АП и обеспечивала низковольтность управляющего напряжения прибора (на уровне 150...250 В);

– сформированное распределение электростатического поля в межэлектродном пространстве планарной структуры обеспечивает защиту лезвия эмиттера от ионной бомбардировки [11], в отличие от типовых структур типа катода Спиндта с соосным острием эмиттера гейт-электродом.

Проведенные в [13] исследования показали существование фоточувствительности предложенной планарной структуры по отношению к облучению потоками фотонов с низкой энергией, существенно ниже энергии, соответствующей красной границе классического фотоэффекта для используемых материалов. Развитие теории туннельного фотоэффекта применительно к исследуемым структурам [14] позволило обосновать характер зависимости величины фототока от напряженности электростатического поля на эмитирующей поверхности, длины волны излучения и его интенсивности. Найденные закономерности являются ключевыми с точки зрения принципиальной возможности разработки широкополосных фотосенсоров с динамической настройкой спектральной чувствительности путем варьирования рабочего напряжения прибора.

Вместе с тем остается недостаточно изученной и понятной роль диэлектрической пленки в обеспечении экспериментально наблюдаемой стабильности.

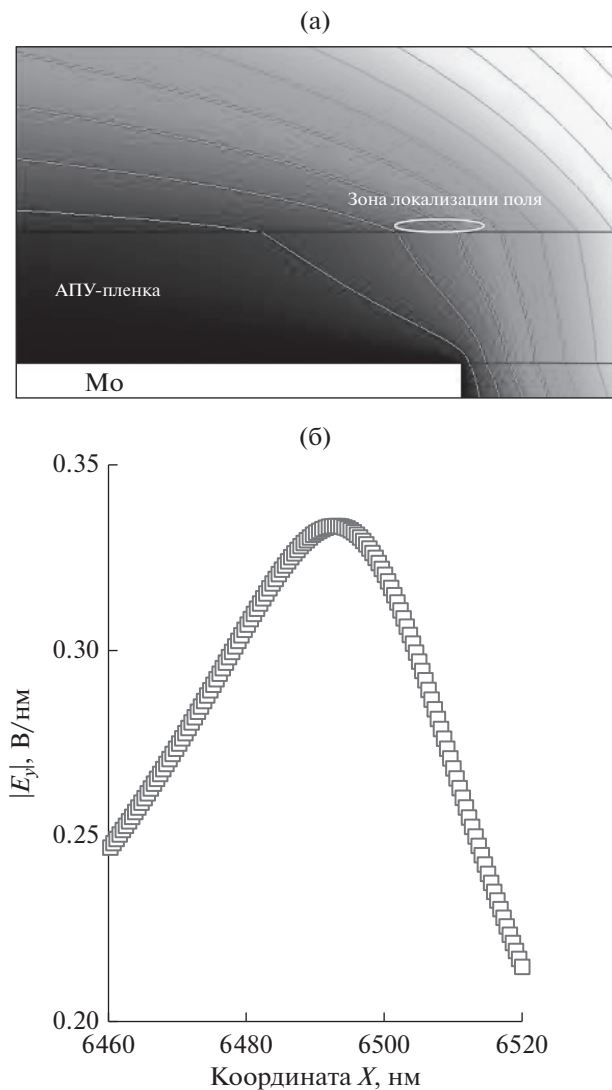


Рис. 2. Результаты моделирования электростатического поля в планарной структуре с пленкой АПУ: а – топограмма распределения потенциалов (шаг между эквипотенциалами 1 В); б – распределение нормальной компоненты E_y вектора напряженности поля на поверхности пленки АПУ.

лизации ПЭ [15] исследуемой планарной структуры с покрытым пленкой АПУ лезвием эмиттера. Цель данной работы – оценка возможных различий параметров локализации электростатического поля в наноструктуре без пленки АПУ и с пленкой, которые определяют интенсивность как тока ПЭ, так и фототока.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для решения поставленной задачи исследования влияния пленки АПУ на условия туннелирова-

ния носителей заряда было рассчитано изменение поля потенциалов в планарной структуре после нанесения диэлектрического покрытия. С этой целью была построена конечно-элементная модель двух вариантов исполнения планарной наноструктуры – с диэлектрической пленкой АПУ толщиной 20 нм и без нее. При проведении расчета в качестве граничных условий использованы значения потенциалов на металлических поверхностях – лезвийном эмиттере, гейте и аноде. Было также учтено, что пленка АПУ является диэлектриком. Результаты распределения поля потенциалов в структуре с диэлектрической пленкой АПУ представлены на рис. 2а в окрестности вершины лезвия (эта зона выделена пунктирной рамкой на рис. 1) в виде тоновой топограммы и линий эквипотенциалей. Видна область сгущения эквипотенциалей вокруг острия Мо-лезвия (зона локализации поля) с пересечением диэлектрической пленки.

С учетом полученного распределения поля потенциалов транспорт электронов может быть описан следующим образом. Сгущение изолиний потенциала в области сопряжения острия Мо-лезвия с пленкой АПУ (повышение напряженности поля) способствует инжекции электронов из молибдена в диэлектрическую пленку, при этом концентрация в нем электронов остается на много порядков ниже, чем в металле. Это приводит к ограничению электропереноса через диэлектрик, который возможен при повышении напряженности поля, например по механизму Пула–Френкеля [16]. На интенсивность же ПЭ с поверхности диэлектрической пленки в вакуум определяющую роль наряду с уровнем напряженности поля играют особые свойства АПУ.

Изначально пленки АПУ привлекли внимание неожиданно высоким уровнем фотоотклика при облучении потоками фотонов с низкой энергией и низким порогом начала ПЭ, которые не соответствовали ни работе выхода алмаза, ни работе выхода графита, и отсутствовали явные причины существования высокого форм-фактора. Механизм этого эффекта оказался связан с присутствием и взаимодействием электронных структур нанокластеров алмаза (Sp^3 -фаза) и тонких граничных оболочек графита (Sp^2 -фаза). Исследование, построение гипотез и обоснование механизма инжекции электронов из графита в гранулы алмаза, обладающего отрицательным электронным сродством, с последующей туннелированием в вакуум было дано в [17]. Было показано, что гидрирование и допирование нанокристаллического алмаза ионами натрия, золота, платины и др. дополнительно снижает работу выхода электронов [18]. Суммарное снижение работы выхода может достигать 2...2.5 эВ. Поэтому в условиях достаточного транспорта электронов сквозь пленку наноразмерной толщины полевая эмиссия с ее поверхности может происходить при сравнительно

малой величине компоненты вектора напряженности поля, нормальной к поверхности. Найденное распределение $|E_y|$ (рис. 2б) имеет плавный максимум. Ширина зоны по уровню $|E_y|$ не ниже 90% от максимума, в которой эмитируется основной ток ПЭ, составляет 30 нм.

Результаты аналогичного расчета для структуры без пленки АПУ (рис. 3) позволяют выявить существенное перераспределение эквипотенциалей, которое приводит к изменению и распределения напряженности поля в зоне туннелирования электронов в вакуум с поверхности острия Мо-лезвия. Видно, что без пленки АПУ максимум $|E_y|$ на Мо-основании возрастает, а ширина зоны локализации по уровню 90% от максимума уменьшается и становится менее 2 нм.

Такое изменение степени локализации означает, что один и тот же уровень тока ПЭ в структуре без пленки АПУ может быть достигнут лишь при условии повышения локальной плотности тока более чем в 15 раз по сравнению со структурой с пленкой АПУ. Однако при повышении плотности тока любая автоэмиссионная структура становится более критичной по отношению к флуктуациям управляющих потенциалов, ухудшается стабильность ПЭ катода, растет вероятность появления необратимых разрушающих процессов. Снижение плотности тока ПЭ также однозначно ведет к уменьшению локальной мощности тепловыделения в зоне туннелирования электронов в вакуум.

Столь существенное снижение требования по локальной плотности тока в структуре с пленкой АПУ, которое следует из анализа расчетных данных об уровне и характере распределения напряженности поля, полученных в двух вариантах исполнения, согласуется с результатами испытаний на долговечность структур. Экспериментальные исследования планарных структур показали, что нанесение пленки АПУ повышает долговечность в режиме длинных импульсов со скважностью 10 и средней плотностью тока ПЭ не ниже 30 мА/см² более чем в 50 раз – до 8700 ч. Эффект многократного увеличения ширины зоны с повышенной напряженностью поля при нанесении наноразмерной диэлектрической пленки АПУ может быть интерпретирован как формирование распределенной зоны локализации поля.

Применение покрытия пленкой АПУ также приводит к повышению фоточувствительности структуры, как следует из анализа данных на рис. 4. Видно, что почти во всем исследованном диапазоне изменения напряженности поля темновой ток молибденового сенсора превосходит темновой ток структуры с пленкой АПУ, а в области малого и среднего уровней напряженности поля отношение темновых токов достигает нескольких единиц. Облучение фотосенсоров когерентным источником света с длиной волны 532 нм (энергия

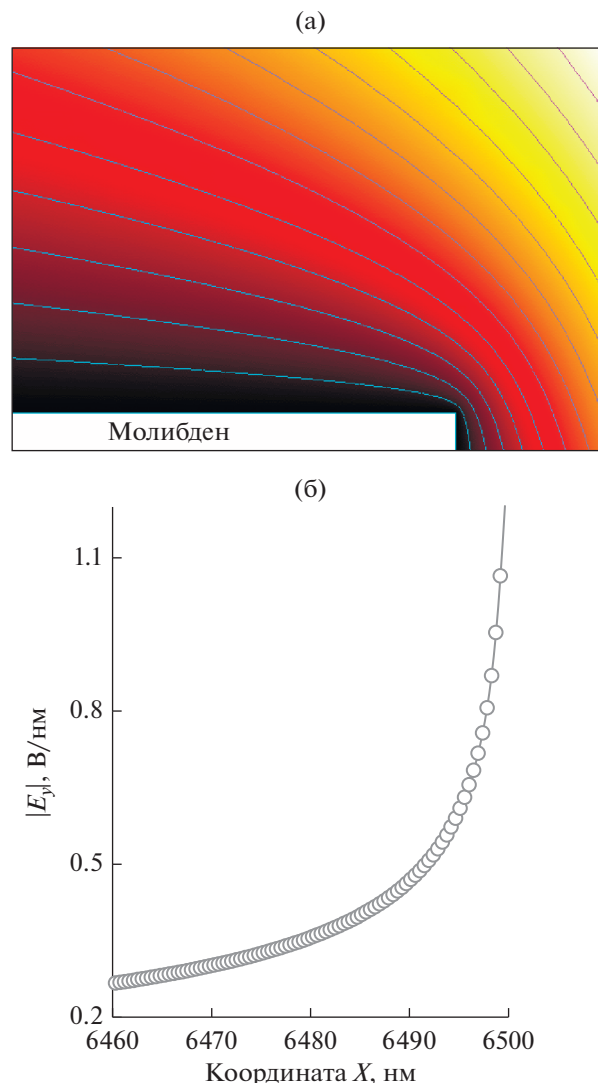


Рис. 3. Результаты моделирования электростатического поля в планарной структуре без пленки АПУ: а – топограмма распределения потенциалов (шаг между эквипотенциалами 1 В); б – распределение нормальной компоненты E_y вектора напряженности поля на поверхности Мо-лезвия.

фотонов ниже красной границы классического фотоэффекта для молибдена, алмаза и графита) приводит к появлению фототока в образцах обоих исполнений (с АПУ-пленкой и без нее), что является следствием туннелирования неравновесных фотоэлектронов в зоне локализации поля на границе поверхности эмиттера с вакуумом. Величина фототока определяется разностью результирующего и темнового токов. Из анализа данных рис. 4 видно, что фототок растет монотонно с повышением напряженности поля. Однако фоточувствительность образца с пленкой АПУ всегда оказывается выше фоточувствительности образца с молибденовым эмиттером, превышая ее до 5 раз в области напряженности поля 30 В/мкм.

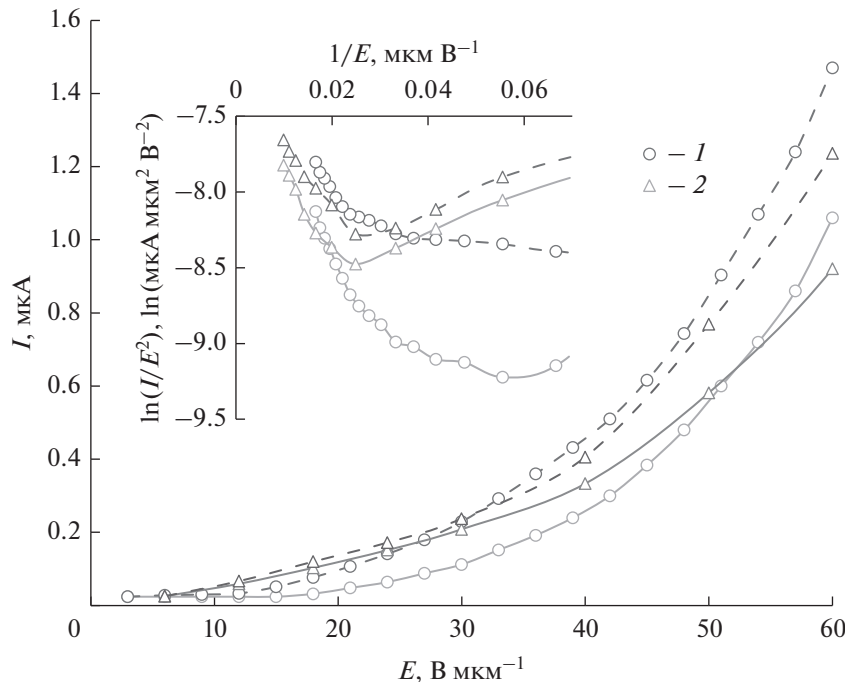


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика фотосенсора с покрытием пленкой АПУ (1) и без пленки АПУ (2): сплошные кривые — темновые характеристики; пунктирные кривые — при облучении когерентным источником света с длиной волны 532 нм (даны в прямых координатах “напряженность поля–ток”, на вставке — в координатах Фаулера–Нордгейма).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного моделирования дают теоретическое обоснование концепции формирования распределенной зоны локализации электростатического поля и мультипликативного эффекта от применения диэлектрической пленки АПУ.

Формирование распределенной зоны локализации электростатического поля обеспечивает повышенную среднюю плотность полевой эмиссии и туннельной фотоэмиссии:

- с пониженными уровнями удельной локальной плотности эмиссии и удельной мощности тепловыделения;

- повышенной стабильностью;

- с низковольтным управлением.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают справедливость сформулированных модельных концепций.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №16-19-10455).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zanin H., May P.W., Hamanaka M.H.M.O., Corat E.J. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. V. 5. № 23. P. 12238.
2. Li Y., Sun Y., Yeow J.T.W. // Nanotechnology. 2015. V. 26. P. 242001.
3. Aban'shin N.P., Mosiyash D.S., Yakunin A.N. // Proc. of 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22–23 Sept. 2016. Saratov. 2016. V. 1. P. 172.
4. Schwoebel P.R., Spindt C.A., Holland C.E. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2003. V. 21. P. 433.
5. Guerrero S.A., Akinwande A.I. // Nanotechnology. 2016. V. 27. P. 295302.
6. Li Z., Yang X., He F. et al. // Carbon. 2015. V. 89. P. 1.
7. Wisitsora-at A., Hsu S.-H., Kang W.P. et al. // J. Vac. Sci. Technol. B. 2012. V. 30. № 2. P. 022204.
8. Huang Z., Huang Y., Pan Z. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 109. P. 233501.
9. Sominski G.G., Sezonov V.E., Taradaev E.P. et al. // Radiophys. Quant. Electron. 2015. V. 58. P. 511.
10. Kato H., O'Rourke B.E., Suzuki R. // Diamond Relat. Mater. 2015. V. 55. P. 41.
11. Гуляев Ю.В., Абаньшин Н.П., Горфинкель Б.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 11. С. 63.
12. Абаньшин Н.П., Аветисян Ю.А., Акчурин Г.Г. и др. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 10. С. 25.
13. Акчурин Г.Г., Якунин А.Н., Абаньшин Н.П. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 12. С. 8.
14. Aban'shin N.P., Akchurin G.G., Avetisyan Y.A. et al. // Proc. SPIE. 2017. V. 10337. P. 1033707.
15. Aban'shin N.P., Mosiyash D.S., Morev S.P., Yakunin A.N. // Proc. of 2016 Int. Conf. on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 22–23 Sept. 2016. Saratov. 2016. V. 1. P. 169.
16. Насыров К.А., Гриценко В.А. // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183. № 10. С. 1099.
17. Krauss A.R., Auciello O., Ding M.Q. et al. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 2958.
18. Robertson J. // Mater. Sci. Engineering: R: Reports. 2002. V. 37. P. 129.