

УДК 621.37

АЛМАЗНОЕ ОКНО С ЛЕГИРОВАННЫМИ БОРОМ СЛОЯМИ ДЛЯ ВЫВОДА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТЬЮ

О. А. Иванов*, С. В. Кузиков, А. А. Вихарев, А. Л. Вихарев, М. А. Лобаев

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предложена конструкция нового типа барьерного окна для вывода сверхвысокочастотного излучения с высокой пиковой и средней мощностью. Рассматривается окно на основе пластины поликристаллического CVD-алмаза с тонкими (нанометровыми) легированными бором слоями с повышенной проводимостью. Такое окно, сохраняя низкие потери излучения за счёт малой суммарной толщины проводящих слоёв и высокую теплопроводность, присущую алмазу, с одной стороны, предотвращает накопление статического заряда на своей поверхности, а с другой — позволяет создать на поверхности легированного слоя постоянное электрическое поле, препятствующее развитию мультипакторного разряда. При этом высокий уровень мощности проходящего излучения и ширины полосы пропускания обеспечивается за счёт выбора конфигурации поля внутри окна в виде бегущей волны.

ВВЕДЕНИЕ

Основными эффектами, ограничивающими уровень мощности проходящего через диэлектрические окна сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения, являются их нагрев, приводящий в конечном итоге к пробое, и развитие на поверхности диэлектрика мультипакторного разряда. Для снижения тепловой нагрузки на окна их стремятся изготавливать из материалов, обладающих одновременно низкими омическими потерями и высокой теплопроводностью. Наиболее перспективным материалом для СВЧ окон в настоящее время считается CVD-алмаз (от английского Chemical Vapour Deposition), обладающий низкими омическими потерями в широком диапазоне сверхвысоких частот (тангенс угла потерь $\operatorname{tg} \delta \approx 10^{-4} \div 10^{-5}$ [1–3]), высокой теплопроводностью, превышающей теплопроводность меди в 5 раз, высокой радиационной и химической стойкостью, а также высокой электрической прочностью, составляющей в постоянном поле 2 ГВ/м [4]. В частности, диски из поликристаллического CVD-алмаза уже нашли широкое применение в миллиметровом диапазоне длин волн в качестве барьерных окон мощных работающих в непрерывном режиме гиротронов и токамаков [5, 6].

Другой важной проблемой, возникающей при разработке диэлектрических окон для большой пиковой мощности СВЧ излучения, является подавление вторично-эмиссионного (мультипакторного) разряда. Механизм развития разряда такого типа связан с лавинообразным размножением приповерхностных свободных электронов, обусловленным вторичной электронной эмиссией. В настоящее время мультипактор рассматривается как крайне нежелательное явление, препятствующее генерации и транспортировке мощного СВЧ излучения. Такой разряд, возникающий на поверхности диэлектрических окон мощных вакуумных СВЧ приборов, не только ограничивает мощность выходного излучения, но и является одной из основных причин разрушения самих окон [7].

Необходимыми условиями возникновения мультипактора на поверхности диэлектрического окна являются наличие того или иного внешнего поля, возвращающего электроны к поверхности, и достижение электронами энергии, при которой коэффициент вторичной эмиссии превы-

* ioleg@appl.sci-nnov.ru

шает единицу. Как правило, при изучении мультипактора на диэлектрических окнах предполагается, что поверхность окна плоская, а электрическое поле СВЧ волны однородно и направлено параллельно его поверхности. В этом случае электрон набирает энергию в СВЧ поле, а возвращающая его на поверхность сила связана либо с зарядом поверхности, либо с неоднородностью СВЧ поля, либо с магнитным полем СВЧ волны. При этом пороговое значение СВЧ поля, после достижения которого неизбежно начинается развитие разряда, в значительной мере определяется возвращающей силой. Отметим, что энергия осцилляторного движения бомбардирующих поверхность электронов обратно пропорциональна квадрату частоты f микроволнового излучения и, следовательно, возрастает при её понижении. Поэтому проблема подавления мультипакторного разряда для частот ниже 10 ГГц становится весьма актуальной уже при относительно низком уровне мощности СВЧ излучения [8]. Например, для частоты $f = 9,4$ ГГц порог возникновения мультипакторного разряда на поверхности диска из CVD-алмаза составлял величину 15 кВ/см [9].

В настоящее время существуют различные методы подавления мультипакторного разряда, которые включают электродинамические методы снижения высокочастотных полей на поверхности диэлектрика выбором соответствующей конфигурации поля [10, 11], а также нанесение на поверхность диэлектрика специальной гофрировки [12, 13] или напыление плёнок с низким коэффициентом вторичной электронной эмиссии (например, TiN [14–16]). К другой группе относятся методы, которые предполагают создание у поверхности диэлектрика внешних электрических [17–19] или магнитных [20, 21] полей, препятствующих возвращению электронов на поверхность. Так, в работах [17, 22] была продемонстрирована возможность подавления мультипактора на поверхности окна в коаксиальном устройстве ввода СВЧ излучения в ускоряющую структуру при использовании электростатического поля. При этом анализировался случай, когда оба поля, как высокочастотное, так и электростатическое, направлены по нормали к поверхности диэлектрика. С нашей точки зрения среди многочисленных предлагаемых методов наиболее привлекательным является метод подавления мультипактора с помощью внешнего постоянного электрического поля [17–19]. Действительно, создавая вблизи поверхности внешнюю силу, отталкивающую электроны, можно предотвратить возникновение электронной лавины независимо от коэффициента вторичной электронной эмиссии материала поверхности. Так, эксперименты [18] показали, что в случае, когда электрическое поле СВЧ волны параллельно поверхности диэлектрического окна, можно эффективно подавлять мультипакторный разряд с помощью внешнего электростатического поля. При этом уже слабое отталкивающее электрическое поле $E_z = -200$ В/см приводило к существенному (более чем на порядок) возрастанию пороговой для возникновения мультипактора мощности СВЧ излучения.

В данной работе рассматриваются окна для мощного СВЧ излучения на основе пластин полукристаллического CVD-алмаза с тонкими легированными бором слоями с заданной проводимостью. Предлагаемое окно, обладая низкими потерями и высокой теплопроводностью, присущей алмазу, предотвращает накопление статического заряда на своей поверхности, а также позволяет приложить к поверхности проводящего слоя постоянное электрическое поле, подавляющее развитие мультипакторного разряда. Представлены результаты расчёта параметров легированных бором слоёв, необходимых для изготовления таких окон, и предложена конструкция «безотражательного» окна для частоты 11,424 ГГц с такими слоями.

1. ПОГЛОЩЕНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОТ АЛМАЗНОГО ДИСКА С ТОНКИМИ ДОПИРОВАННЫМИ БОРОМ СЛОЯМИ

Как было отмечено выше, для создания нормального к поверхности алмазного окна статического электрического поля его поверхность должна обладать проводимостью, т. е. алмазный

диск должен содержать тонкий проводящий слой. Обычно поликристаллические алмазные диски с диаметром до 100 мм и толщиной около 2 мм для применения в окнах для мощного СВЧ излучения синтезируют в микроволновых плазмохимических реакторах [23] при использовании газовой смеси CH_4/H_2 . В последнее время также достигнут значительный прогресс в создании тонких (нанометровых) легированных бором слоёв, как на поверхности, так и внутри монокристаллического алмаза [24–27]. При этом для роста легированного слоя используется газовая смесь $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{H}_2\text{B}_6$, подаваемая в CVD-реактор на короткое время. Изменяя концентрацию диборана H_2B_6 и время подачи смеси в реактор, можно варьировать толщину и концентрацию бора (проводимость) в слое. Характерная структура легированного бором слоя, полученная с помощью вторично-ионной масс спектроскопии, показана на рис. 1, где $[B]$ — концентрация бора, d — толщина слоя.

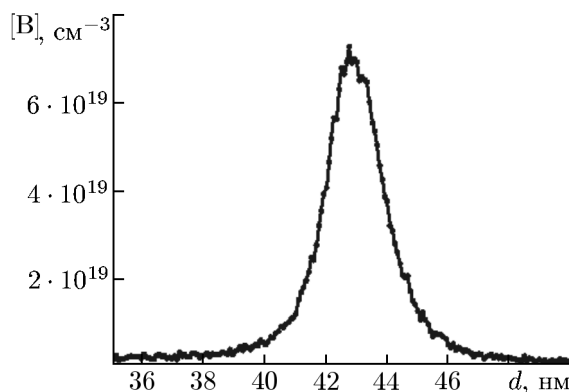


Рис. 1. Типичный профиль легированного бором слоя с толщиной 2 нм вблизи поверхности алмазной подложки [25]

Таким образом, технология создания легированных бором слоёв с толщиной от единиц нанометров до нескольких микрон и заданной концентрацией бора в настоящее время достаточно хорошо отработана. Отметим, что использование легирования позволяет снять проблему получения однородной плёнки с высокой адгезией к материалу окна, обычно возникающую при напылении на него плёнок из чужеродного материала (например, TiN [28]), т. к. тонкий борированный слой изменяет лишь проводимость поверхности алмаза, существенно не изменяя его внутреннюю структуру.

Отметим, что выращиваемый на поверхности алмаза проводящий слой не должен вносить заметных потерь в прошедшее через окно СВЧ излучение. Поэтому для оценки возможности реализации данного предложения были проведены расчёты поглощения СВЧ излучения в тонком легированном бором слое на поверхности алмазной пластины. При этом предполагалось, что на полубесконечную среду из алмаза, имеющую на границе тонкий проводящий слой с различным содержанием бора, по нормали к её поверхности падает плоская электромагнитная волна на частоте 11,424 ГГц. Такая частота применяется во многих электронных ускорителях, используемых для различных приложений. В ходе расчётов определялся коэффициент поглощения P_{loss} (рассчитываемый как отношение поглощаемой мощности излучения P_{abs} к мощности падающего излучения P_0), вносимого такой проводящей плёнкой. Необходимая для расчётов связь концентрации атомов бора $[B]$ с концентрацией и подвижностью носителей N_p (проводимостью) в слое определялась на основании работы [29]. Результаты расчёта для слоёв с разной толщиной и концентрацией бора представлены на рис. 2, где кривые 1–3 начинаются с определённых минимальных значений толщины легированного слоя. Эти минимальные толщины определяются требованием обеспечения заданной минимальной величины статического поля, которая способна препятствовать развитию одностороннего мультипакторного разряда на поверхности окна. В соответствии с результатами эксперимента [18] предполагалось, что необходимая величина статического поля составляет не менее $E_{\text{min}} = 200$ В/см. Это поле может создаваться лишь носителями заряда q в валентной зоне легированного слоя алмаза ($E = 2\pi q/S$, где S — площадь поверхности диска). При этом полный заряд q определяется концентрацией дырок N_p в слое как $q = eN_p S d$, где d — толщина легированного слоя, e — элементарный заряд. Поэтому для создания требуемого статического поля слой должен содержать достаточное количество свободных носителей заряда,

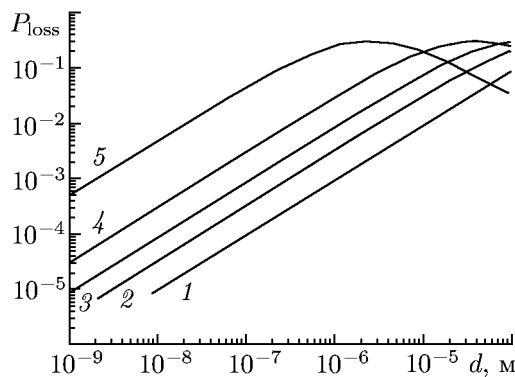


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения P_{loss} от толщины слоя и концентрации бора [B] в нём (кривая 1: [B] = 10^{16} см $^{-3}$, $N_p \sim 10^{14}$ см $^{-3}$; 2: [B] = 10^{17} см $^{-3}$, $N_p \sim 10^{15}$ см $^{-3}$; 3: [B] = 10^{18} см $^{-3}$, $N_p \sim 10^{16}$ см $^{-3}$; 4: [B] = 10^{19} см $^{-3}$, $N_p \sim 10^{17}$ см $^{-3}$; 5: [B] = 10^{20} см $^{-3}$, $N_p \sim 10^{18}$ см $^{-3}$)

были проведены расчёты потерь энергии при прохождении электромагнитной волны через алмазные диски с различными толщинами с легированным бором слоем. Такие оценки важны для выбора толщины алмазного диска, используемого в качестве окна для СВЧ излучения. При расчётах предполагалось, что диск обладает диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 5,7$ и тангенсом угла потерь $\text{tg } \delta = 10^{-4}$ и на его поверхности выращен легированный бором слой с толщиной 1 мкм и концентрацией носителей $N_p \sim 10^{14}$ см $^{-3}$. Схема диска показана на рис. 3а. Расчётная зависимость коэффициентов отражения ($|R|^2$) и поглощения (P_{loss}) от толщины алмазного диска на частоте 11,4 ГГц приведена на рис. 3б.

Из рис. 3б следует, что коэффициент отражения R резко падает, когда толщина диска становится кратной половине длины волны падающего излучения, т. е. когда окно является «резонансно-просветлённым». Однако такая толщина даже на выбранной частоте составляет около 6 мм, на более низких частотах требуются ещё более толстые диски, что становится неприемлемо из-за сложности изготовления и удорожания таких дисков. Предпочтительно использовать для изготовления окон алмазные диски с толщиной 1,5÷2,0 мм. В этом случае низкого приемлемого коэффициента отражения можно добиться, устанавливая перед диском дополнительные согласующие отражатели (диафрагмы или уступы), компенсирующие отражение от границ диска. При этом СВЧ поле в окне представляет собой чисто бегущую волну, а его величина внутри диска и поглощение минимальны в достаточно широкой полосе просветления [30–32].

2. КОНСТРУКЦИЯ РЕЗОНАНСНОГО ОКНА С ЭФФЕКТОМ ПОДАВЛЕНИЯ МУЛЬТИПАКТОРА В 3-САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Рассмотренный в работе [18] метод подавления мультипактора на диэлектрике создаёт предпосылки для его использования в окнах для СВЧ излучения с тангенциальной к поверхности составляющей высокочастотного электрического поля. В существующих конструкциях таких окон [28], как правило, затруднительно ввести внутрь конструкции дополнительный элемент (электрод) и использовать внешнее электрическое поле для подавления мультипактора. Применение алмазных дисков с легированными бором слоями значительно упрощает эту задачу. Действительно, проводящий слой позволяет создавать электрическое поле на поверхности алмазного диска, по-

а произведение $N_p d$ должно удовлетворять неравенству $N_p d \geq E_{\text{min}}/(2\pi e)$.

Таким образом, проведённые расчёты (рис. 2) показывают, что тонкие легированные бором слои с толщиной до 1 мкм не вносят существенного поглощения СВЧ излучения ($P_{\text{abs}}/P_0 < 10^{-3}$) в широком диапазоне величин проводимости (степени легирования) слоёв. При изготовлении окон оптимальное соотношение между толщиной слоя и концентрацией бора (носителей) в слое может быть выбрано в зависимости от удобства осуществления конкретных режимов легирования и экспериментально определённой величины электрического поля, необходимого для подавления мультипакторного разряда.

Как отмечалось выше, основой для рассматриваемого окна служит достаточно толстый диск из поликристаллического CVD-алмаза. Поэтому

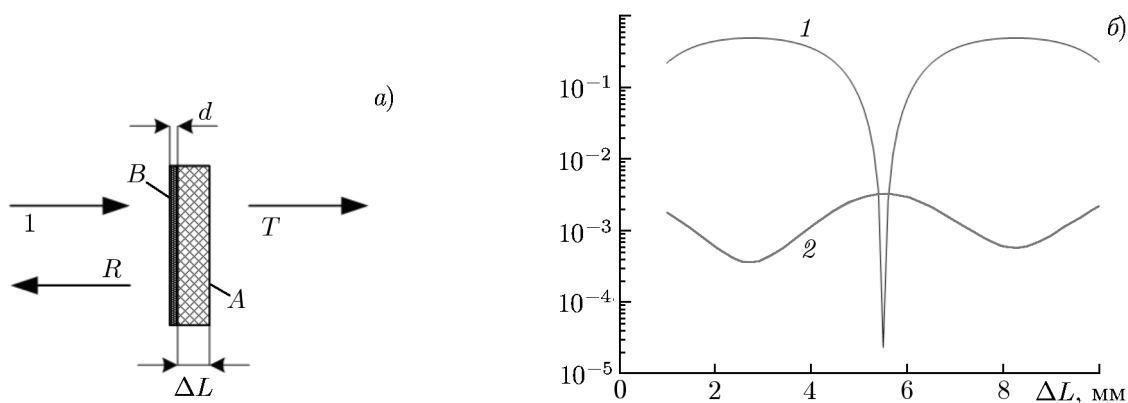


Рис. 3. Схема алмазного диска A с легированным бором слоем B с толщиной 10^{-6} м и концентрацией носителей $N_p \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ (а) и зависимость коэффициентов отражения ($|R|^2$, кривая 1) и поглощения (P_{loss} , кривая 2) от его толщины (б)

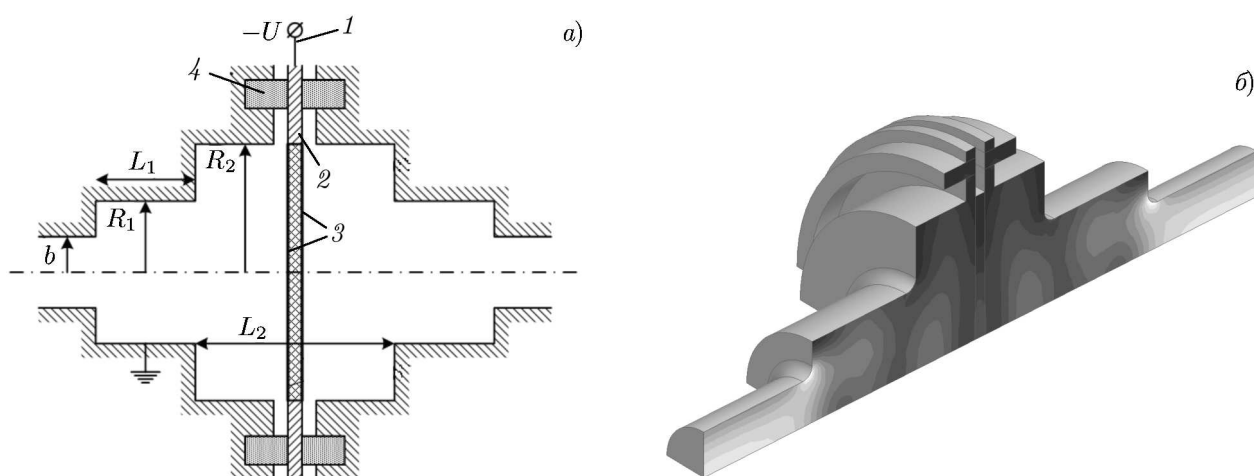


Рис. 4. Конструкция окна для 3-сантиметрового диапазона длин волн (а; 1 — высоковольтный электрод, 2 — алмазное окно, 3 — легированные бором слои, 4 — дроссельная канавка и изолятор) и распределение электрического поля в узле окна на входной моде TE_{01} прямоугольного волновода (б; белый цвет соответствует максимальному значению, чёрный — нулевому)

давая постоянный отрицательный потенциал непосредственно на его торец без введения дополнительного электрода в конструкцию окна.

Как отмечалось выше, наряду с низким поглощением проходящего СВЧ излучения, окно должно обладать низким коэффициентом отражения. Поэтому для компенсации отражения от границ алмазного диска конструкция окна должна содержать дополнительные отражатели, как это было предложено в работе [32]. В 3-сантиметровом диапазоне длин волн конструкция окна может выглядеть так, как показано на рис. 4а. Входной и выходной волноводы — это одномодовые волноводы с прямоугольными поперечными сечениями. Алмазный диск симметрично вставлен в отрезок круглого волновода, содержащего расширение, в котором возможно распространение двух мод, TE_{11} и TM_{11} , возбуждаемых на скачкообразных расширениях. Микроволновое излучение транспортируется через алмазный диск на суперпозиции мод TE_{11} и TM_{11} круглого волновода, которые вблизи окна при оптимальном подборе отношения радиусов R_2/R_1 (см. рис. 4а) формируют гауссово распределение поля в поперечном сечении. При этом набег взаимной фазы этих мод на отрезке L_2 составляет около 4π . Структура высокочастотного электрического поля

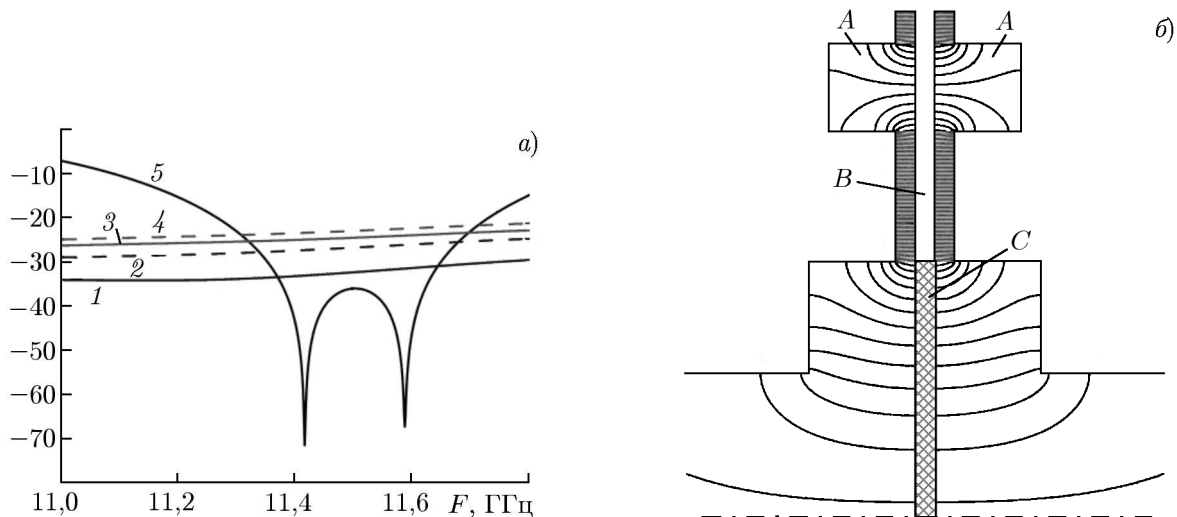


Рис. 5. (а) Частотные зависимости коэффициентов поглощения (P_{loss} , кривые 1–4) и отражения ($|R|^2$, 5) излучения, выраженных в децибелах, в узле СВЧ окна на основе алмазного диска с легированными бором слоями: $\text{tg } \delta = 10^{-4}$, $d = 100$ нм (1); $\text{tg } \delta = 10^{-4}$, $d = 1$ мкм (2); $\text{tg } \delta = 10^{-3}$, $d = 100$ нм (3); $\text{tg } \delta = 10^{-3}$, $d = 1$ мкм (4); $[B] = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $N_p \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. (б) Структура линий электростатического поля внутри узла СВЧ окна, возникающая при подаче на окно постоянного потенциала: А — изоляторы, В — высоковольтный электрод, С — алмазный диск

в окне показана на рис. 4б. При этом электрическое поле волны спадает в месте крепления алмазного диска. Расчёты показывают, что амплитуда электрического поля на поверхности алмазного диска и в области ввода высоковольтных электродов в 4,7 раза ниже, чем поле в подводящем волноводе. Такое распределение СВЧ поля повышает электропрочность окна и облегчает подачу постоянного потенциала на поверхность алмазного диска.

Наличие скачкообразных расширений позволяет также скомпенсировать отражение от границ алмазного диска (см. рис. 3б) даже для дисков с относительно небольшой, около 2 мм, толщиной. Для этого есть два основных параметра скачкообразного расширения: перепад размеров R_1 и b , от которых зависит коэффициент отражения, а также расстояние между расширением и соответствующей гранью диска L_1 , от которого зависит относительная фаза вносимого расширением отражения. Управляя этими двумя параметрами, можно полностью скомпенсировать отражение от каждой грани диска и, соответственно, от всего окна на заданной частоте. Результаты расчёта коэффициентов отражения и поглощения окна с алмазным диском радиуса $R_2 = 25$ мм и толщины 2 мм при различном тангенсе угла потерь в алмазной пластине и толщине легированных бором слоёв представлены на рис. 5а. Расчёты показали, что при уровне легирования $[B] = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, толщине слоёв от 100 нм до 1 мкм и $\text{tg } \delta \leq 10^{-3}$ суммарные потери излучения в данной конструкции не превышают -25 дБ. Кроме того, наличие легированных бором слоёв в этом диапазоне параметров не вносит заметных изменений в мощность отражённого от окна излучения.

Как было отмечено выше, рассматриваемая конструкция предполагает создание постоянно-го отрицательного потенциала на проводящем слое алмазного диска. Поэтому алмазный диск крепится в блоке окна с помощью диэлектрических вставок из керамики или тефлона, выполняющих одновременно роль изоляторов для подводимого постоянного потенциала (см. рис. 4а). При этом диэлектрические вставки помещаются в расширения, чтобы за счёт резонансного отражения рабочей волны предотвратить просачивание СВЧ излучения наружу. На рис. 5б приведена структура линий электростатического поля, возникающего вблизи поверхности алмазного диска при

подаче на него отрицательного потенциала. Расчёты показывают, что при подаче на алмазный диск постоянного напряжения $U = -1$ кВ вблизи его центра возникает нормальное к поверхности диска электростатическое поле с амплитудой $E_z = -370$ В/см. Таким образом, необходимое для подавления мультипакторного разряда электрическое поле может быть получено уже при относительно низком прикладываемом напряжении.

Отметим, что для излучения более длинноволнового диапазона (для частот порядка 1 ГГц) рассмотренная конструкция не очень пригодна, т. к. требует дорогих и сложных в изготовлении дисков из CVD-алмаза с большим диаметром. Поэтому в этом диапазоне более предпочтительной может оказаться конструкция «тёплого» окна на основе коаксиального волновода (см. например, [31]). Использование коаксиальной структуры позволяет резко снизить требования на диаметр алмазных дисков из-за снятия ограничений на частоту распространяющейся по такому волноводу волны. При этом предложенный метод подавления мультипакторного разряда за счёт внешнего статического поля остаётся в силе [16], но требует отдельного анализа. В то же время для квазиоптических окон [5, 6], обычно используемых в области более высоких частот (выше 30 ГГц), рассмотренная конструкция может быть использована после весьма незначительной доработки.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено резонансное окно для вывода СВЧ излучения с высокой пиковой и средней мощностью, изготовленное на основе пластины из поликристаллического CVD-алмаза с тонким (нанометровым) легированным бором слоем с повышенной проводимостью. Такое окно, обеспечивая низкие потери проходящего излучения за счёт малой толщины проводящего слоя и высокую теплопроводность, присущую алмазу, с одной стороны, предотвращает накопление статического заряда на поверхности окна, а с другой — позволяет создать на поверхности легированного слоя постоянное электрическое поле, препятствующее развитию мультипакторного разряда. Проведённые оценки и расчёты демонстрируют возможность создания алмазного окна с легированными бором слоями (с толщиной порядка 100 нм) и суммарными потерями СВЧ излучения, не превышающими 0,1 %. При прохождении через такое окно СВЧ излучения со средней мощностью 1 МВт необходимо утилизировать с края алмазного диска толщины 2 мм и диаметра порядка 50 мм поток тепла до 300 Вт/см². При этом, если исходить из экспериментально продемонстрированного в работе [18] значения порога мультипакторного разряда 120 кВ/см (при внешнем электрическом поле $E_z \sim -200$ В/см), то пиковое значение мощности проходящего СВЧ излучения будет составлять величину порядка 200 МВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Garin B. M., Parshin V. V., Myasnikova S. E., Ralchenko V. G. // *Diamond and Related Materials*. 2003. V. 12. P. 1755.
2. Ibarra A., Gonzfilez M., Vila R., Mollfi J. // *Diamond and Related Materials*. 1997. V. 6. P. 856.
3. Parshin V. V., Vikharev A. L., Heidinger R., et al. // 35th IEEE Int. Conf. Plasma Science. Karlsruhe, Germany, 15–19 June 2008. doi: 10.1109/PLASMA.2008.4590796.
4. Status and Applications of Diamond and Diamond-Like Materials: An Emerging Technology. Report of the Committee on Superhard Materials. NMAB-445. Washington: National Academy Press, 1990. P. 79.
5. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., et al. // *J. Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. 2011. V. 32. P. 337.

6. Thumm M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V.39. P.971.
7. Neuber A., Dickens J., Hemmert D., et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. P.296.
8. Kishek R. A., Lau Y. Y. // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 80. P.193.
9. Ivanov O. A., Lobaev M. A., Isaev V. A., et al. // Plasma Phys. Reports. 2010. V. 36, No. 4. P. 336.
10. Vikharev A. L., Gorbachev A. M., Ivanov O. A., et al. // Phys. Rev. ST-Accel. Beams. 2009. V. 12. Art. no. 062003.
11. Klein U., Pronch D. // Proc. Conf. Future Possibilities Electron Accelerators. Charlottesville: University of Virginia, 1979. P.1.
12. Padamsee H., Pronch D., Kneisel P., et al. // IEEE Trans. Magn. 1981. V.17. P.947.
13. Chang C., Huang H. J., Liu G. Z., et al. // J. Appl. Phys. 2009. V.105. Art. no. 123305.
14. Nayaiesh A. R., Garwin E. L., King F. K., et al. // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V.4, No. 5. P.2356.
15. Michizono S., Kinbara A., Saito Y., et al. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1992. V. 10, No. 4. P.1180.
16. Hatfield L. L., Boerwinkle E. R., Leiker G. R., et al. // IEEE Trans. Electr. Insul. 1989. V.24. No. 6. P.985.
17. Tuckmantel J. Technical report 94-26. Geneva: CERN LEP-2 Notes. 1994. 27 p.
18. Ivanov O. A., Lobaev M. A., Isaev V. A., Vikharev A. L. // Phys. Rev. ST-Accel. Beams. 2010. V.13. Art. no. 022004.
19. Yla-Oijala P., Ukkola M. // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. 2001. V. A474. P.197.
20. Valfells A., Ang L. K., Lau Y. Y., et al. // Phys. Plasmas. 2000. V. 7, No. 2. P. 750.
21. Zhang X., Wang Y., Fan J. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. Art. no. 022110.
22. Moller W. D., Shu Q. S., Susta J. T., et al. // 12th Int. Workshop RF Superconductivity. 2005. V. 441, No. 1–2. P. 239.
23. Bogdanov S., Vikharev A., Gorbachev A., et al. // Chem. Vap. Deposition. 2014. V. 20. P. 32.
24. Fiori A., Jomard F., Teraji T., et al. // Thin Solid Films. 2014. V. 557. P. 222.
25. Vikharev A. L., Gorbachev A. M., Lobaev M. A., et al. // Phys. Status Solidi RRL. 2016. V. 10. P. 324.
26. Edgington R., Sato S., Ishiyama Y., et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. Art. no. 033710.
27. Mer-Calfati C., Tranchant N., Volpe P. N., et al. // Materials Letters. 2014. V. 115. P. 283.
28. Michizono S., Kinbara A., Saito Y., et al. // J. Vac. Sci. Technol. 1992. V. A10, No. 4. P.1180.
29. Barjon J., Habka N., Mer C., et al. // Phys. Status Solidi RRL. 2009. V. 3. No. 6. P. 202.
30. Otake Y., Tokumoto S., Kazakov S. Yu., et al. // Proc. Third Workshop Pulsed RF Sources Linear Colliders, Kanagawa, Japan, Apr. 1996. P.315.
31. Tokumoto S., Chin Y. H., Mizuno H., et al. // arXiv:hep-ex/0008039. 2000. 3 p.
32. Kazakov S. High-power RF sources and components for linear colliders. Chicago: Fermi National Accelerator Laboratory, 2007. 69 p.

Поступила в редакцию 6 апреля 2016 г.; принята в печать 23 декабря 2016 г.

THE DIAMOND WINDOW WITH BORON-DOPED LAYERS FOR THE OUTPUT OF MICROWAVE RADIATION AT HIGH PEAK AND AVERAGE POWER LEVELS

O. A. Ivanov, S. V. Kuzikov, A. A. Vikharev, A. L. Vikharev, and M. A. Lobayev

We propose a novel design of the barrier window for the output of microwave radiation at high peak and average power levels. A window based on a plate of polycrystalline CVD diamond with thin (nanometer-thick) boron-doped layers with increased conductivity. Such a window, which retains the

low level of radiation loss due to the small total thickness of the conductive layers and high heat conductivity being typical of diamond, prevents accumulation of a static charge on its surface, on the one hand, and allows one to produce a dc electric field on the surface of the doped layer impeding the development of the multipactor discharge, on the other hand. In this case, a high level of the power of the transmitted radiation and the transmission bandwidth is ensured by selecting the configuration of the field inside the window in the form of a traveling wave.