

Методика контроля параметров автоэлектронной эмиссии катодов магнетронов с холодным запуском

*В.И. Капустин, И.П. Ли, А.В. Шуманов, С.О. Москаленко
Москва, АО «Плутон», ул. Нижняя Сыромятническая, 11

*Москва, Московский технологический университет (МИРЭА), пр. Вернадского, 78
E-mail: ork@pluton.msk.ru, kapustin@mirea.ru

Разработана цифровая измерительная система для регистрации вольт-амперных характеристик автоэмиссионных катодов СВЧ приборов. Предложена новая методика обработки экспериментальных результатов, позволяющая контролировать характер формирования автоэмиссионных вискерообразных структур на поверхности катодов – изменение их поверхностной плотности, геометрических размеров, работы выхода.

The Method of the Field Emission Parameters Control of the Magnetron Cathodes with Cold Switching. V.I.Kapustin, I.P.Li, A.V. Shumanov, S.O.Moskalenko. The digital measuring system for cathode I-V characteristics detection was developed. The new suggested method for experimental results processing is allowed to control the nature of the field emission whiskers forming on the cathode surface – the deviation of it's surface density, geometric dimensions, work function.

Одним из важных классов электровакуумных (ЭВП) СВЧ приборов являются магнетроны с безнакальным запуском. Начальная генерация в таком приборе обеспечивается током автоэлектронной эмиссии с одной части катода, а поддержание генерации – током вторичной электронной эмиссии с другой части катода [1]. Схема катодного узла такого прибора показана на рис. 1а.

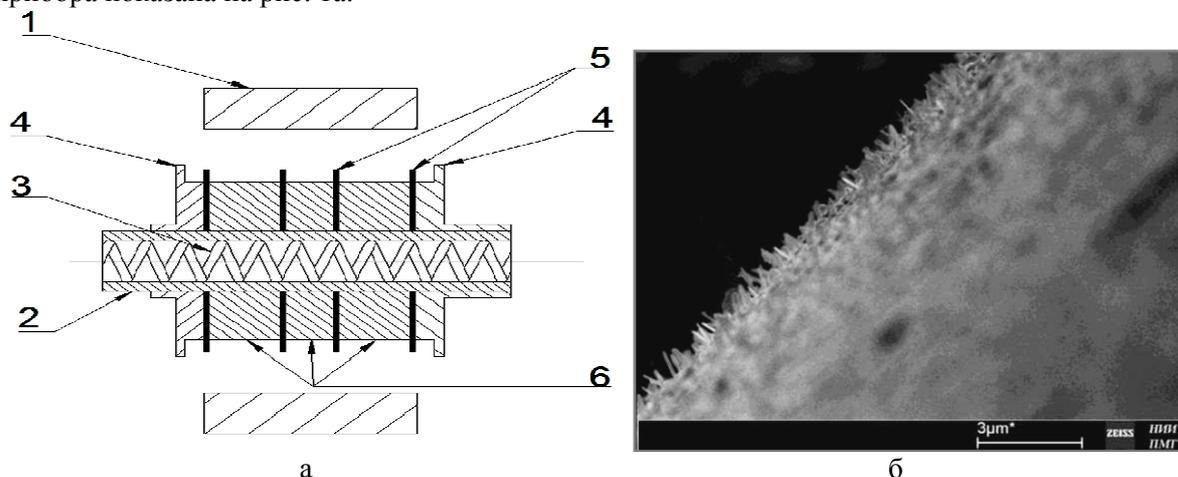


Рис. 1. Конструкция катодного узла магнетрона с безнакальным запуском (а) и вид торца танталовых автоэмиссионных катодов (б).

На рис. 1а обозначено: 1 – анодный блок магнетрона, 2 – керн катода, 3 – подогреватель, 4 – концевые экраны, 5 – автоэмиссионные катоды в виде танталовых шайб толщиной 2-4 мкм, выступающие над поверхностью катода на 100-200 мкм, 6 – вторично-эмиссионные палладий-бариевые катоды. Автоэлектронная эмиссия с торцевой поверхности шайб 5 происходит с так называемых вискерообразных структур, формирующихся в виде палладиевых столбиков диаметром в доли микрона и высотой в несколько микрон. На рис. 1б приведена микрофотография профиля шайб 5, на которой сформировались острия из палладия из состава катодных шайб 6 [1].

На рис. 2 показана модель торцевой поверхности танталовой шайбы, на которой в процессе тренировки и работы СВЧ ЭВП сформировались палладиевые вискеры. В рамках

предлагаемой модели принимается, что в среднем имеется два типа вискеро́в – длинные и короткие, которые, к тому же, могут быть покрыты барием. В процессе тренировки приборов коэффициент усиления поля $\beta \approx h/a$ [2] может изменяться, где h – высота острия, a – его поперечный размеры. В процессе откачки ЭВП с прогревом катода острия могут покрываться барием, снижающим работу выхода, а при подаче высокого напряжения и роста вискеро́в барий может «уходить», что приведет к повышению работы выхода. На рис. 2 обозначено: 1 и 3 – длинные, 2 и 4 – короткие вискеро́в; 3 и 4 – вискеро́в, покрытые барием; 5 – центры зарождения вискеро́в; 6 – длинные вискеро́в, образовавшиеся на этапах активирования катода; 7 – наклоненные вискеро́в; К – катод с отрицательным потенциалом относительно анода А. На рисунке также обозначены ионы, которые могут образовываться при ионизации остаточных газов прибора и направления их движения в поле между А и К.

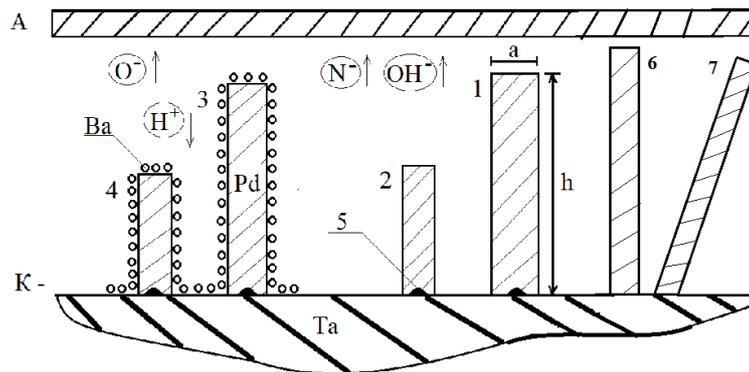


Рис. 2. Модель структуры поверхности автокатада СВЧ прибора.

Острия формируются на дефектах на поверхности тантала – ступеньках роста, дислокациях, прежде всего винтовых, границах зерен. Так как температура тренировки катодов не превышает $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в первом приближении можно считать, что поверхностная плотность центров роста постоянна, но происходит перераспределение по типам 1-7. Из рис.2 видно, что ионная бомбардировка ввиду малости массы иона H^+ не может приводить к распылению вискеро́в и потенциально возможной пленки бария на их поверхности. В то же время состав и структура поверхности вискеро́в может изменяться в результате полевого испарения. Величина электронного сродства палладия равна $0,56\text{ эВ}$, барий не образует отрицательных ионов, но может образовываться ион BaO^- . Величина его электронного сродства неизвестна, но можно ожидать, что она лежит в интервале $1,46\text{ эВ}$ для O^- и $2,0\text{ эВ}$ для OH^- . Поэтому в электрическом поле будут испаряться ионы Pd^+ , меняя форму вершин вискеро́в, и ионы BaO^- при наличии в остаточной среде кислорода, меняя покрытие поверхности вискеро́в барием. Термическая диффузия палладия по поверхности вискеро́в не может обеспечить их рост из-за отсутствия градиента концентрации палладия на поверхности вискеро́в. Поэтому на рис.2 переход от вискеро́в типа 2 к типу 1 может быть только из-за электродиффузии ионов Pd^+ по поверхности вискеро́в. А это может быть и на этапе активирования катода при напряжении анод-катод порядка 100 В , и при подаче высокого напряжения $2-4\text{ кВ}$ на катод в процессе работы ЭВП. В то же время перенос бария по поверхности вискеро́в может проходить и из-за наличия градиента концентрации бария, и при подаче напряжения, но при наличии следов кислорода в остаточных газах из-за электродиффузии ионов BaO^- по поверхности вискеро́в.

На рис. 3 приведена типичная вольт-амперная характеристика автокатада прибора, приведенного на рис. 1а, представленная в координатах Фаулера-Нордгейма. Кривая рис.3 имеет три характерные области: 1 - область с большим разбросом данных, видимо, из-за автоэмиссии с вершин нерегулярных вискеро́в типа 6-7, и областей 2 и 3 с малым разбросом данных, которые относятся к остриям 1-2 или 3-4. Участок 1 в общем случае может содержать 2 участка, обусловленных электродиффузией Pd^+ и BaO^- по поверхности вискеро́в.

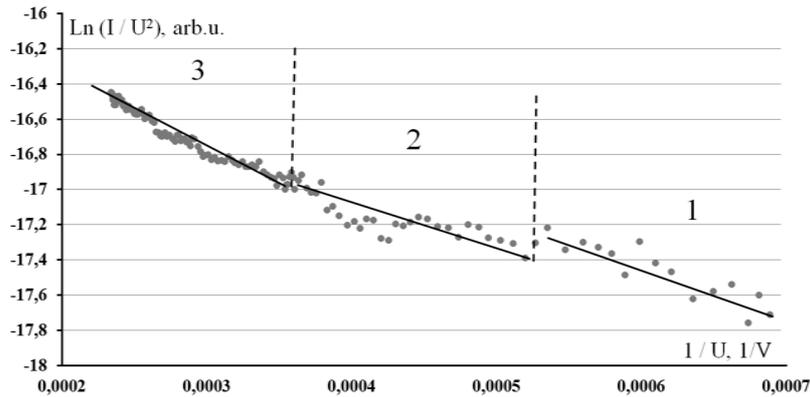


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика автокатода прибора в координатах Фаулера-Нордгейма.

Известно, что плотность тока автоэмиссии с катода описывается уравнением Фаулера-Нордгейма [3]

$$j = B \cdot \frac{E^2}{\varphi} \exp\left[-S \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{E} \cdot \theta(\varphi)\right], \quad (1)$$

где константы

$$B = \frac{e^2}{8\pi m}; \quad S = \frac{8\pi (2m)^{1/2}}{3 h}, \quad (2)$$

при этом функция Нордгейма $\theta(\varphi)$ равна

$$\theta(\varphi) = 0,965 - 0,739y^2; \quad y = \frac{(eE)^{1/2}}{\varphi}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (1), получаем

$$j = B \cdot \frac{E^2}{\varphi} \exp\left[0,739 \cdot S \cdot \frac{e}{\varphi^{1/2}} \cdot \theta(\varphi)\right] \cdot \exp\left[-0,965 \cdot S \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{E}\right]. \quad (4)$$

Если принять, что $E = \frac{U}{d}\beta$, где d – расстояние катод – анод, то, логарифмируя (4), получаем

$$\ln\left(\frac{j}{U^2}\right) = \ln\left(\frac{B}{d^2}\right) + \ln\left(\frac{\beta^2}{\varphi}\right) + 0,739 \cdot S \cdot \frac{e}{\varphi^{1/2}} - 0,965 \cdot S \cdot \frac{\varphi^{3/2}d}{\beta} \cdot \frac{1}{U}. \quad (5)$$

В координатах $\ln\left(\frac{j}{U^2}\right) \div \frac{1}{U}$ соотношение (5) будет прямой линией вида

$$y = a - bx, \quad (6)$$

где параметры

$$a = \ln\left(\frac{B}{d^2}\right) + \ln\left(\frac{\beta^2}{\varphi}\right) + 0,739 \cdot S \cdot \frac{e}{\varphi^{1/2}}, \quad b = 0,965 \frac{Sd\varphi^{3/2}}{\beta} \quad (7)$$

В [3] предложено строить диаграмму в координатах $a \div b$, но такая диаграмма недостаточно информативна, так как оба параметра сложным образом зависят от параметров φ и β .

Выберем следующие координаты для анализа экспериментальных результатов

$$C = b^2 \exp(a) = \alpha_1 \cdot \varphi^2 \exp\left(\frac{\alpha_2}{\varphi^{1/2}}\right) \equiv "y" \quad (8)$$

$$D = \frac{1}{b} = \alpha_3 \cdot \frac{\beta}{\varphi^{3/2}} \equiv "x" \quad (9)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ константы, не зависящие от работы выхода и геометрии электродов.

Видно, что параметр C зависит только от работы выхода φ , а параметр D прямо пропорционален β и обратно пропорционален $\varphi^{3/2}$. Поэтому анализ экспериментальных

результатов целесообразно проводить в рамках модели, приведенной на рис. 4а и рис. 4б, отдельно для участков 2 и 3 по рис. 3 – для длинных и коротких вискеров.

В варианте 1 работа выхода вискеров не меняется в процессе тренировки, при этом длинные «усы» уменьшаются (разрушаются), а короткие – растут. Поэтому диаграмма в координатах «у» = С; «х» = D будет иметь вид, показанный на рис. 4а. Это будут две горизонтальные линии, на которых точки по времени тренировки смещаются по стрелкам.

В варианте 2 при тренировке ЭВП работа выхода вискеров может меняться. Поэтому из (8) следует, что параметр С меняется сильно – экспоненциально, а параметр D – более слабо, по степенному закону. Изменение φ в процессе активирования будет видно, если графики на рис. 4б не будут горизонтальными. В этом случае для каждого типа острия возможны варианты, показанные на рис. 4б: 1 – φ – уменьшается, β – постоянна; 2 – φ – уменьшается, β – уменьшается. Скобкой показан диапазон кривых для данного случая; 3 – φ – уменьшается, β – растет; 4 – φ – растет, β – постоянна; 5 – φ – растет, β – уменьшается; 6 – φ – растет, β – растет. Видно, что при уменьшении φ кривые идут вверх от точки F, а при увеличении φ – вниз от точки F.

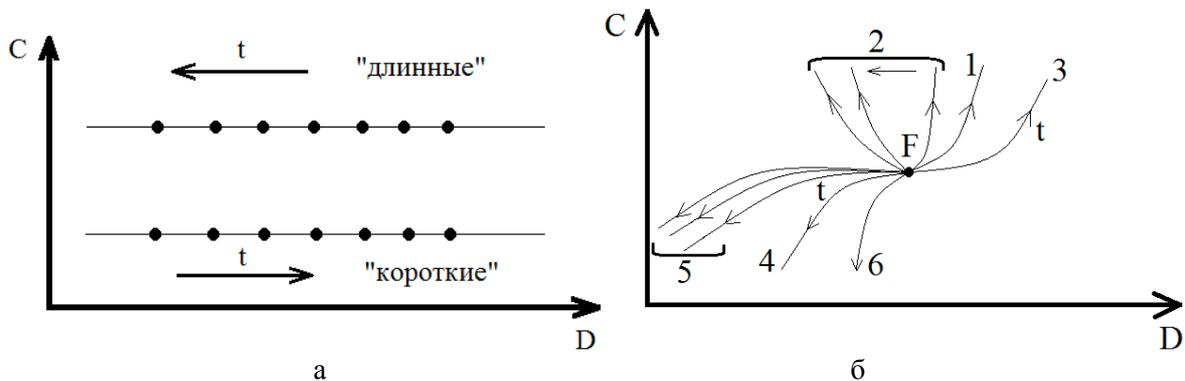


Рис. 4. Вид диаграммы $C \div D$ для варианта 1 (а) случая изменения φ в процессе активирования катода (б), где F – исходная точка.

На рис. 5 приведены зависимости значений параметров С и D автокатода от времени тренировки прибора при напряжении на катоде 1500 В для участков 1, 2 и 3, отмеченных на рис. 3.

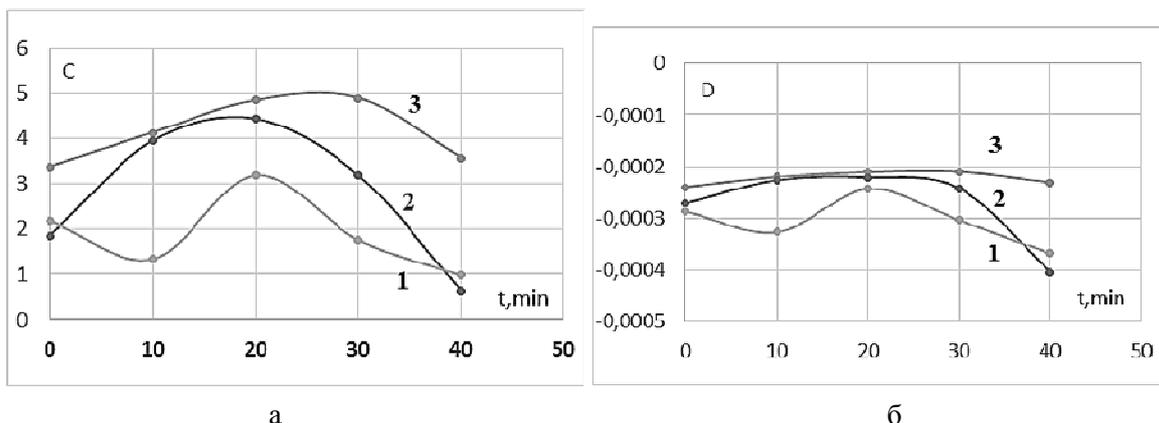


Рис. 5. Зависимости значений параметров С (а) и D (б) от времени тренировки автокатода.

На рис. 6а показано изменение соотношения между параметрами С и D для участка 3 вольт-амперных характеристик, а на рис. 6б – для участка 1.

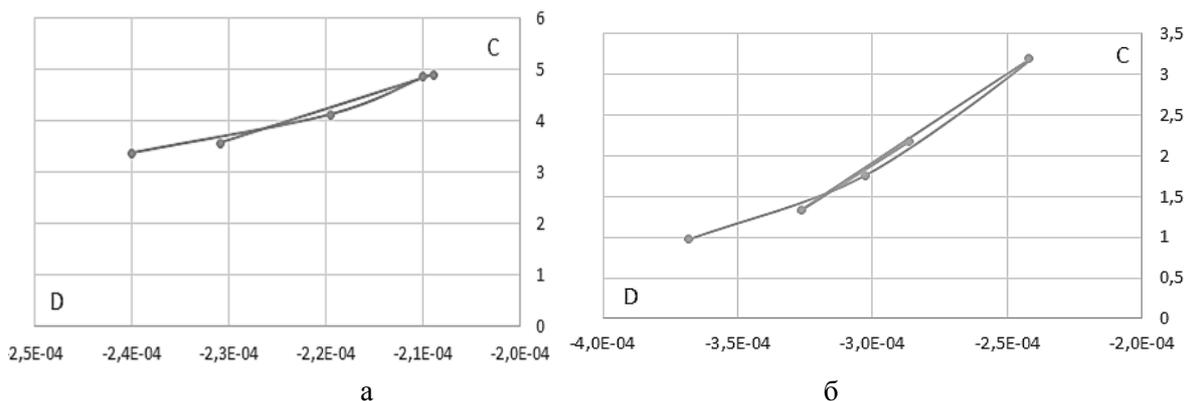


Рис. 6. Соотношения между параметрами C и D для участка 3(а) и участка 1 (б) рис. 3.

Сравнение результатов рис. 6а и 6б показывает, что характер изменения параметров вискероов, ответственных за данные участки, идентичен и в целом соответствует случаю 3 на рис. 4б.

На рис. 7 показано изменение соотношения между параметрами C и D для участка 2 вольтамперных характеристик.

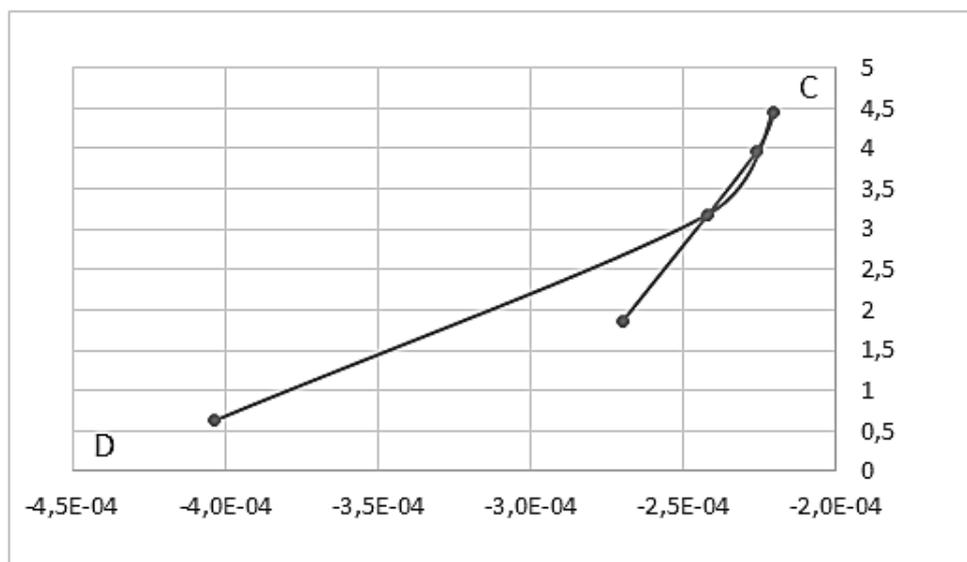


Рис. 7. Изменение соотношения между параметрами C и D для участка 2 рис. 3.

На начальном участке тренировки прибора в течение 20 мин. кривая на диаграмме C–D для вискероов, ответственных за данный участок кривой Фаулера-Нордгейма, возрастает, причем характер этого изменения аналогичен соответствующим участкам кривых на рис. 6. Однако при дальнейшей тренировке катода спад кривой на рис. 7 более сильный, чем спад кривых на рис. 6.

В свете модели, приведенной на рис. 2, участок 1 при малом напряжении на катоде можно приписать вискероам типа 6 и 7, участок 2 – вискероам типа 1 и 3, участок 3 – вискероам типа 2 и 4. В свете данной интерпретации экспериментальных результатов, тренировка автоэмиссионного катода при подаче на него высокого напряжения приводит к изменению степени покрытия вискероов пленкой бария, а для некоторых типов вискероов – и изменению их геометрических размеров.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана цифровая измерительная система для регистрации вольтамперных характеристик автоэмиссионных катодов СВЧ приборов. Предложена новая методика обработки экспериментальных

результатов, позволяющая контролировать характер формирования автоэмиссионных вискеров на поверхности катодов – изменение их поверхностной плотности, геометрических размеров, работы выхода.

Литература

8. Ли И.П., Петров В.С., Поляков В.С. и др. Одновременное активирование автоэлектронного исторично-эмиссионного катодов магнетрона с безнакальным запуском // Известия вузов. Электроника. 2014. Том 30, № 3(107). С. 30-36.
9. Бельский М.Д., Бочаров Г.С., Елецкий А.В., Sommerer T.J. Усиление электрического поля в холодных полевых катодах на основе углеродных нанотрубок // ЖТФ. 2010. Том 80, вып. 2. С. 130-137.
10. Егоров Н.В., Шешин Е.П. Автоэлектронная эмиссия. Принципы и приборы // М.: Издательство "Интеллект". - 704 с.

Влияние микропримесей на электронную структуру оксида бария

**В.И. Капустин, И.П. Ли, А.В. Шуманов, С.О. Москаленко, *В.И. Свитов
Москва, АО «Плутон», ул. Нижняя Сыромятническая, 11
*Москва, Московский технологический университет (МИРЭА), пр. Вернадского, 78
E-mail: ork@pluton.msk.ru, kapustin@mirea.ru*

Методами оптической и электронной спектроскопии исследовано влияние микропримесей на электронную структуру оксида бария. Установлено, что некоторые типы микропримесей упорядочивают кислородные вакансии, а некоторые формируют дополнительные поверхностные состояния вблизи края валентной зоны.

The Influence of Micro Impurities on the Electron Structure of Barium Oxide. V.I.Kapustin, I.P.Li, A.V.Shumanov, S.O.Moskalenko, V.I.Svitov. By using of the optical and the electron spectroscopy the influence of micro impurities on the electron structure of barium oxide was investigated. It was determined that some impurities regulate the oxygen vacancies but some impurities form new surface states near the valence band.

Эмиссионные свойства и металлопористых, оксидных, и оксидно-никелевых, и палладий-бариевых, и скандатных катодов определяются эмиссионными свойствами кристаллитов ВаО, которые формируются в катодном материале на этапе его изготовления и активирования и определяются типом и концентрацией точечных дефектов в ВаО[1]. Схема влияния точечных дефектов на эмиссионные параметры ВаО приведена в таблице 1. Таблица составлена с учетом того обстоятельства, что в ионных кристаллах с широкой запрещенной зоной дефекты донорного типа в объеме кристалла создают на поверхности дефекты акцепторного типа, а дефекты акцепторного типа в объеме кристалла создают на поверхности дефекты донорного типа [2].