

Перевод Отзыва

京都
大学



Рецензия на автореферат диссертации Евгения Олеговича Попова «Методика и результаты исследования многоострийных полевых эмиттеров большой площади», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.04 - Физическая электроника

Ожидается, что устройства с полевой эмиссией электронов станут одним из возможных кандидатов на создание новых электронных устройств и промышленных источников электронных пучков. Однако общеизвестно, что надёжный источник электронов до сих пор не разработан. Трудно достичь стабильной электронной эмиссии из-за поверхностных явлений, таких как изменение работы выхода из-за адсорбции и десорбции молекул остаточного газа. Бомбардировка ионизированных молекул остаточного газа изменяет структуру поверхности эмиттера. Определение характеристик поверхности полевого эмиттера имеет большое значение для создания надёжных источников электронов с автоэмиссией. Однако интересующая нас область эмиссии очень мала, и дать ей характеристику непросто. Здесь следует подчеркнуть, что теория или моделирование, которые могут объяснить экспериментальные результаты практических полевых эмиттеров, не представлены даже сейчас, несмотря на то, что основная теория была создана несколько десятков лет назад. Для определения характеристик полевых эмиттеров необходимо детальное моделирование практических полевых эмиттеров. Затем необходимы хорошо организованные эксперименты, в которых можно получить различную информацию об излучателе. Для этой цели настоятельно необходима новая методика исследования свойств автоэлектронной эмиссии.

На этом фоне настоящая диссертация посвящена разработке и описанию полевых излучателей; в главе 1 рассматриваются основные уравнения, применимые к практическим полевым эмиттерам. Глава 2 посвящена разработке некоторых уникальных полевых излучателей. Глава 3 посвящена разработке нового устройства, которое может исследовать свойства электронной эмиссии, получая различные параметры эмиттера. Глава 4 посвящена разработке новых методов определения характеристик электронной эмиссии. Эти четыре главы удовлетворяют вышеупомянутым требованиям для понимания физики полевой электронной эмиссии.

В главе 1 теория автоэмиссии была пересмотрена с использованием общего барьерного метода. Ограничения теории были разъяснены, и была определена напряжённость поля, при которой действительна теория, разработанная Мерфи и Гудом. Результаты дают хорошее представление о вольт-амперных характеристиках автоэмиссии. В главе 2 было разработано несколько полевых эмиттеров. Каждый эмиттер имеет уникальные особенности, позволяющие избежать вышеупомянутых проблем полевых эмиттеров. В этой диссертации стабильная работа жидкокомпьютерного источника электронов была достигнута за счёт приложения синусоидального напряжения соответствующей частоты и большой амплитуды. Также разработаны другие типы полевых эмиттеров из металлических микронаконечников и нанокомпозитов, в состав которых входят углеродные нанотрубки. Нанокомпозиты с углеродными нанотрубками обладают преимуществом своей самоорганизующейся микроструктуры для создания высокого электрического поля. Большой ток 125 мА был достигнут с эмиттером из многослойных углеродных нанотрубок и полистирола.

КИОТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Большой электронный ток расширяет область применения полевых эмиттеров. В главе 3 был разработана новая измерительная установка для одновременного получения свойств электронной эмиссии и других условий эмиттеров, таких как температура эмиттеров и диаграмма эмиссии. С помощью этого инструмента также возможен анализ молекул газа, образующихся при электронной эмиссии. Ещё одна особенность установки - быстрое и медленное сканирование высокого напряжения. Наиболее важной особенностью является возможность анализа свойств электронной эмиссии *in situ*. Работоспособность представленного инструмента свидетельствует о высоком уровне автора в области проектирования электроники. Этот прибор - мощный инструмент для раскрытия всех особенностей полевых излучателей. В главе 4 предлагаются новые способы обработки вольт-амперных характеристик. Методика, разработанная в предыдущей главе, позволяет проводить анализ полевых излучателей на месте. Одной из уникальных особенностей настоящего метода является то, что автор применил SK-анализ, который может определить коэффициент усиления поля и работу выхода эмиттера. Сам SK-анализ был предложен в начале 90-х годов, но интерпретация проанализированных данных еще не налажена. Определение характеристик полевых эмиттеров с помощью настоящего устройства продолжит исследования SK-анализа. Анализ был применен к эмиттерам из нанокомпозитов на основе графена. Выявлено изменение параметров эмиттера и предложены явления, происходящие на поверхности эмиттера. Для понимания практических свойств полевой эмиссии были представлены многие другие методы определения характеристик. Масс-спектрометр показал, что электронная бомбардировка противоэлектрода может очистить его поверхность.

Каждая глава содержит большое количество результатов исследований. Накоплены важные знания по физике и химии эмиттера и его поверхности. Практически применимые методы определения характеристик полевых эмиттеров были представлены сложной измерительной аппаратурой, разработанной автором. Исходя из содержания делаю вывод, что диссертационная работа доктора Евгения Олеговича Попова удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии по докторским диссертациям, изложенным в пункте 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Правительством Российской Федерации РФ от 24 сентября 2013 г. № 842. Таким образом, делаю вывод, что кандидат д-р Евгений Олегович Попов, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук (специальность 01.04.04 - физическая электроника).

Yasuhito Goto

Ясухито Гото, доктор философии,
Доцент кафедры электронных наук и инженерии Киотского университета
12 февраля 2021 г.

КИОТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Департамент электронных наук и инженерии, Высшая школа инженерии Нишикё, Киото 615-8510
ЯПОНИЯ



**Review of the Abstract of the Dissertation of Eugeni Olegovich Popov, entitled
"Methodology and research results of large area multi-point emitters", submitted for
the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, specialty 01.04.04 -
Physical Electronics**

Field electron emission devices are expected to serve as one of possible candidates for novel electron devices and industry applicable sources of electron beams. However, it is generally known that reliable electron source has not yet been developed. It is difficult to attain stable electron emission because of the surface phenomena such as work function change due to adsorption and desorption of residual gas molecules. Bombardment of the ionized residual gas molecules alters the surface structure of the emitter. Characterization of the surface of the field emitter is of great importance to develop reliable field emission electron sources. However, the region of interest is very small and the characterization is not easy. It should be stressed here that the theory or modeling that can explain the experimental results of the practical field emitters has not been given even at now, despite that the basic theory has been established several ten years ago. To establish the characterization of the field emitters, detailed modeling of the practical field emitters is inevitable. Then, well organized experiments where various information of the emitter can be acquired are necessary. For this purpose, novel technique to investigate the field emission properties is strongly desired.

Under such background, the present dissertation is devoted to the development and characterization of the field emitters; Chapter 1 deals with the basic equations applicable for practical field emitters. Chapter 2 deals with the development of some unique field emitters. Chapter 3 deals with the development of the novel apparatus that can investigate the electron emission properties, acquiring various emitter parameters. Chapter 4 deals with the development of the novel methods for characterization of the electron emission properties. These four chapters satisfy the afore-mentioned requirements to understand the physics of the field electron emission.

In Chapter 1, the field emission theory was re-examined using the general barrier method. Limitations of the theory have been clarified, and the field strength at which the theory developed by Murphy and Good is valid was derived. The results give a good measure in characterization of the field emission current-voltage characteristics. In Chapter 2, several field emitters have been developed. Each emitter has unique features that can avoid the afore-mentioned problems of the field emitters. In this dissertation, stable operation of liquid metal electron source was achieved by application of sinusoidal voltage with an appropriate frequency and a large amplitude. Other types of the field emitters of metal micro-tips and nanocomposites which include carbon nanotubes are also developed. Nano-composites with carbon nanotubes have an advantage of their self-organized microstructure to achieve a high electric field. A large current of 125 mA was achieved with multiwall carbon nanotube-poly styrene composite emitter. The large



electron current widens the application field of the field emitters. In Chapter 3, a new apparatus for simultaneous acquisition of the electron emission properties and the other conditions of the emitters such as temperature of the emitters and emission pattern was developed. Analysis of gas molecules produced under the electron emission is also possible with this apparatus. Fast and slow scan of the high voltage is another feature of the apparatus. The most important feature is capability of in situ analysis of the electron emission properties. The performance of the present apparatus shows high level skill of electronics design of the author. This apparatus is a powerful tool to reveal the entire figure of the field emitters. In Chapter 4, the novel ways for processing the current-voltage characteristics are proposed. The apparatus developed in the previous chapter enables in situ analysis of the field emitters. One of the unique features of the present method is that the author adopted SK analysis that can derive the field enhancement factor and the work function of the emitter. The SK analysis itself was proposed in early 90s, but interpretation of the analyzed data has not yet been established. Characterization of the field emitters with the present apparatus will further proceed the research of the SK analysis. The analysis was applied to graphene-based nanocomposite emitters. The variation of the emitter parameters was extracted and phenomena occurring on the emitter surface were suggested. Many other characterization techniques were presented to understand the practical field emission properties. Mass spectrometer revealed that the electron bombardment on the counter electrode can clean up the surface of it.

Each chapter contains large amount of research progresses. Important knowledges on the physics and chemistry of the emitter and its surface are accumulated. Practically applicable characterization methods of the field emitters have been presented with a sophisticated measurement apparatus which was developed by the author. Judging from the content, I conclude that the dissertation work of Dr. Eugeni Olegovich Popov satisfies all the requirements of the Higher Attestation Commission for doctoral dissertations set out item 9 of the "Regulations on the award of academic degrees" approved by the Government of the Russian Federation of September 24, 2013 No. 842. Therefore, I conclude that the candidate, Dr. Eugeni Olegovich Popov, deserves to be awarded the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Specialty 01.04.04 - physical electronics).

A handwritten signature in cursive script, appearing to read "Yasuhito Gotoh".

Yasuhito Gotoh, PhD,
Associate Professor, Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University

February 12, 2021

KYOTO UNIVERSITY

Department of Electronic Science and Engineering, Graduate School of Engineering
Nishikyo, Kyoto 615-8510 JAPAN