



Факультет  
Инженерные и физические науки  
Гилфорд, Суррей GU2 7XH UK  
Т: +44 (0) 1483 686100  
Факс: +44 (0) 1483 534139  
[www.surrey.ac.uk](http://www.surrey.ac.uk)

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

Хотя я уверен, что уважаемая группа экспертов будет очень хорошо осведомлена о ситуации, существующей в предметной области, в которой работает кандидат, я считаю полезным начать своё выступление с описания ситуации, как я её вижу.

Полевая эмиссия (ПЭ) - эмиссия электронов с поверхности материала под действием сильного отрицательного электростатического поля - является одной из научных парадигм квантово-механического туннелирования и имеет важное значение как таковое. Автоэлектронная эмиссия представляет значительный научный и технический интерес в двух основных контекстах. Это один из возможных механизмов «электрического пробоя» как в вакууме, так и на воздухе: как таковой он является возможным объяснением различных природных явлений, а также причиной, которое может препятствовать работе многих технологических устройств, в том числе ускорителей заряженных частиц, используемых в ядерной физике высоких энергий.

Другой контекст заключается в том, что ПЭ - это эмиссионный механизм источников электронов, которые имеют множество разнообразных применений и потенциальных применений в технологии. Эти источники электронов делятся на два основных типа: одноострийные эмиттеры электронов (например, используемые в электронных микроскопах и других электронно-лучевых приборах, где требуется высокая электронно-оптическая яркость) и так называемые полевые эмиттеры электронов большой площади (LAFE), которые являются формой источника электронов большой площади. За последние двадцать были исследованы многие материалы в качестве кандидатов для источников эмиссионных электронов, в том числе источники, включающие углеродные нанотрубки и родственные материалы, которые являются особенно перспективными.

Как по фундаментальным, так и по прикладным причинам желательно иметь хорошее понимание теории эмиссии. Однако нынешнее понимание ограничено, и большая часть анализа экспериментальных данных основана в основном на подходах, которые не учитывают существование атомов и рассматривают модели излучателей как гладкие плоские поверхности большой боковой протяжённости. Современная основная теория ПЭ (введённая Мерфи и Гудом в 1956 году и впоследствии немного изменённая) правильно предсказывает общие качественные тенденции. Но ни на одном этапе за последние 90 лет, прошедшие с момента выхода оригинальной работы Фаулера и Нордгейма, не было надёжного и точного количественного сравнения между теорией ПЭ и экспериментом ПЭ.

Точная и надёжная характеристика источников излучения (особенно LAFE), возникающих в результате исследований и разработок, является ещё одной технологической потребностью. Однако практика сообщества ПЭ является слабой и состоит в основном в попытках использовать так называемый график Фаулера-Нордгейма (FN) для извлечения - из измеренных вольт-амперных характеристик - параметра, называемого коэффициентом усиления поля, который характеризует, наиболее острые отдельные эмиттеры в LAFE. Однако этот метод построения FN-графика очень часто применяется в ситуациях, когда это недопустимо (поскольку на результаты измерений влияют характеристики системы измерения, а не только процесс эмиссии), и очень много паразитных сигналов, как следует из опубликованных результатов исследований. В настоящее время существует «ортодоксальный тест», который можно применить к измеренным вольт-амперным характеристикам, чтобы обнаружить «неидеальные» ситуации такого типа.



Соискатель представил в своём автореферате очень подробное изложение своих значительных достижений. Я считаю, что они делятся на четыре основные группы.

Во-первых, соискатель и возглавляемая им исследовательская группа разработали эффективную систему анализа данных в реальном времени. Среди других опций, это позволяет извлекать эффективные значения параметров характеристики и может проверять их достоверность, выполняя ортодоксальный тест, все в режиме реального времени и очень много раз в секунду. Таким образом, можно исследовать усреднённое поведение во времени и изменение поведения в реальном времени. Это особенно важно при исследовании поведения реальных технологических излучателей, предназначенных для работы в условиях промышленного вакуума: в таких условиях излучатели, имеют ограниченную стабильность. Также имеется возможность сопоставления вольт-амперных характеристик с эмиссионными картинками излучения.

Очевидно, что установка такого типа имеет национальное значение в Российской Федерации, которая имеет долгую и непрерывную историю технологических исследований полевых эмиттеров электронов. Насколько мне известно, такое средство анализа данных не имеет аналогов в мире.

Во-вторых, соискатель и его группа уже давно проводят исследования материалов, которые позволят изготавливать эффективные полевые эмиттеры электронов большой площади, которые имеют высокую плотность тока эмиссии и являются надёжными при работе в условиях промышленного вакуума. Большая часть недавних работ группы была связана с плёнками на основе углеродных нанотрубок. Как уже указывалось, считается, что материалы такого типа особенно перспективны. Первоначальным мотивом для разработки этого типа излучателя была связь с электронными дисплеями, но для дисплеев другая технология оказалась коммерчески более выгодной. В настоящее время основной технологической движущей силой является потребность в улучшенных портативных рентгеновских устройствах и улучшенных микроволновых генераторах. Соискатель охарактеризовал поведение исследуемых материалов.

В-третьих, соискатель исследовал различные эффекты, проявляемые исследуемыми эмиттерами, включая эффекты типа гистерезиса, и предоставил возможные физические объяснения того, что происходит в деталях в этой очень сложной ситуации.

В-четвертых, соискатель провёл работу, направленную на улучшение существующих формулировок теории излучения и ясности, с которой они сформулированы. Одно из этих исследований, инициированное автором, но позже проведённое в сотрудничестве с данным рецензентом, представляется потенциально очень важным для развития предметной области. Это связано с тем, что в конечном итоге (впервые за более чем 90 лет) этот подход позволит провести эффективную проверку деталей теорий полевой электронной эмиссии. Эта методология основана на так называемом эмпирическом уравнении ПЭ, которое было впервые разработано в 1930-х годах и (для идеального эмиттера) записывает измеренный ток  $I$  как функцию измеренного напряжения  $V$  в виде

$$I = CV^k \exp[-B/V],$$

где  $C$ ,  $B$  и  $k$  в первом приближении рассматриваются как константы. У соискателя была революционная идея о том, что (с учётом использования современных вычислительных мощностей) наилучшее значение  $k$  для данного набора данных тока-напряжения можно найти, выполнив несколько регрессий для близко расположенных различных значений  $k$ , а затем выбрав наиболее подходящее значение. Посредством моделирования он и его группа показали, что наиболее подходящее значение  $k$  чрезвычайно чувствительно к особенностям используемой теории излучения. Значение  $k$  также зависит от формы излучателя, поэтому необходимо провести дополнительную работу по моделированию, чтобы установить детали корректировок, которые необходимо будет внести. По-прежнему существует потребность в высокоточных и хорошо охарактеризованных стабильных экспериментальных данных, чтобы метод можно было с пользой протестировать на реальных данных, но принцип метода был чётко установлен с помощью моделирования.

Кроме того, соискатель (на мой взгляд) лично вносит небольшой, но значительный вклад в международную стандартизацию описаний теории автоэлектронной эмиссии. Российская ПЭ наука традиционно сильна, особенно в Советское время. Однако сопутствующие российские научные достижения (особенно теоретические) не всегда получают заслуженный международный авторитет. Более того, особенно после реформ 1970-х годов в международной системе измерения, наблюдается некоторое расхождение между методами, используемыми для описания теории ПЭ в русскоязычной и англоязычной литературе. В большей степени, чем многие учёные ПЭ его поколения, работающие в России, д-р Попов работает над расширением использования международных стандартов.

По всем этим причинам, основываясь на результатах, изложенных в диссертации, и на личном знании работы кандидата, я прихожу к выводу, что диссертационная работа доктора Евгения Олеговича ПОПОВА удовлетворяет всем требованиям Высшей аттестационной комиссии к докторским диссертациям, изложенным в пунктах «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Правительством РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, как мне объяснили. Я прихожу к выводу, что соискатель, доктор Евгений Олегович ПОПОВ, заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук (специальность 01.04.04 - физическая электроника), и что присуждение этой степени будет вполне заслуженным и обоснованным.



(Д-р) Ричард Г. Форбс

MA, PhD, DSc, FInstP, FIET, SMIEEE

Дипломированный физик (Великобритания), дипломированный инженер (Великобритания), европейский инженер, иностранный член Российской академии естественных наук

Приглашённый лектор (ранее лектор) в области нанонауки в сильных электрических полях Университета Суррея, Институт передовых технологий

20 января 2021 г.

E-mail: [r.forbes@surrey.ac.uk](mailto:r.forbes@surrey.ac.uk)



UNIVERSITY OF  
SURREY

Faculty of  
Engineering & Physical Sciences

Guildford, Surrey GU2 7XH UK

T: +44 (0)1483 686100

F: +44 (0)1483 534139

[www.surrey.ac.uk](http://www.surrey.ac.uk)

21 January 2021

Natalya Vitalievna Teplova  
34.01.03 Ioffe Institute  
The Academic Secretary of the Dissertation Council

Ioffe Institute  
Politekhnikeskaya st, 26  
SAINT-PETERSBURG  
Russia 194021

Dear Academic Secretary,

re:

**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, Speciality 01.04.04 – Physical Electronics.**

Please find enclosed a review document that Dr Eugeni Popov has asked me to send to you. My apologies that I am unable to submit this in Russian.

Yours sincerely,

(Dr) Richard G. Forbes  
Visiting Reader  
Advanced Technology Institute  
University of Surrey (UK)

E-mail: [r.forbes@surrey.ac.uk](mailto:r.forbes@surrey.ac.uk)

**[For correspondence, if needed, please use personal e-mail, NOT letter post]**



THE QUEEN'S  
ANNIVERSARY PRIZES  
For Merit and Future Education  
2011



**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, Speciality 01.04.04 – Physical Electronics.**

Although I am sure that the distinguished Panel of Examiners will be extremely well aware of the situation existing in the subject area where the candidate works, I will find it helpful to start my remarks by describing the situation as I see it.

Field electron emission (FE)—the emission of electrons from a material surface under the influence of a high negative electrostatic field—is one of the paradigm examples of quantum mechanical tunnelling, and has importance as such. Field electron emission is of significant scientific and technological interest, in two main types of context. It is one of the possible mechanisms of "electrical breakdown", both in vacuum and in air: as such, it is a possible explanation of various natural phenomena and also a phenomenon that can impede the operation of many technological devices, including the high-gradient particle accelerators used in high-energy nuclear physics.

The other context is that FE is the emission mechanism of electron sources that have many and varied applications and potential applications in technology. These electron sources divide into two main types: single-point electron emitters (such as are used in electron microscopes and other electron-beam instruments where high electron-optical brightness is required), and so-called large-area field electron emitters (LAFEs), which are a form of large-area electron source. Many candidate emitter materials have been explored in the last twenty years or so; sources involving carbon nanotubes and related materials show particular promise.

Both for fundamental and for applications reasons, good understanding of emission theory is desirable. However, present understanding is limited, and most experimental data analysis is based mainly on approaches that disregard the existence of atoms and model emitters as smooth flat planar surfaces of large lateral extent. Present mainstream FE theory (introduced by Murphy and Good in 1956, and subsequently modified slightly) predicts general qualitative trends correctly. But at no stage in the last 90 years since the original work of Fowler and Nordheim has there been a reliable and precise quantitative comparison between FE theory and FE experiment.

The accurate and reliable characterisation of emitters (particularly LAFEs) emerging from research and development activities is another technological need. However, FE community practice is weak, and consists mainly in attempts to use a so-called Fowler-Nordheim (FN) plot to extract—from measured current-voltage characteristics—a parameter called a field enhancement factor that characterises how sharp the most strongly emitting individual emitters in the LAFE are. However, this FN-plot technique has very often been applied under circumstances where it is not valid to do so (because measured results are being influenced by the characteristics of the measurement system, rather than by the emission process alone), and very many spurious characterisation results have been published. There now exists an "orthodoxy test" that can be applied to measured current-voltage characteristics, in order to detect "non-ideal" situations of this type.



The candidate has provided in his abstract a very detailed summary of his considerable achievements. My perception is that these fall into four main groups.

First, the candidate and the research group that he leads have developed an efficient real-time data analysis system. Amongst other options, this can extract apparent values of characterization parameters, and can test their validity by carrying out an orthodoxy test, all in real time, and very many times per second. Thus, average behaviour over time, and changing behaviour in real time, can be investigated. This is particularly important when investigations are being made into the behaviour of real technological emitters, intended to operate in industrial vacuum conditions: in such circumstances emitters have limited stability. Provision to correlate current-voltage characteristics with emission images is also available.

A facility of this kind is obviously of national value in the Russian Federation, which has a long and continuing history of technological research into field electron emitters. As far as I am aware, a data-analysis facility of this kind is unique in the world.

Second, the candidate and his group have long been conducting a search for materials that would allow the fabrication of efficient large area field electron emitters, that have high emission current densities and are robust when operating in industrial vacuum conditions. Much of the group's recent work has been with carbon-nanotube-based films. As already indicated, materials of this kind are widely considered to show particular promise. The original motive for developing this type of emitter was in connection with electronic displays, but for the displays a different technology proved commercially superior. At present, the main present technological driving forces are the need for improved portable X-ray devices, and improved microwave generators. The candidate has characterised how the investigated materials behave.

Third, the candidate has investigated various effects exhibited by the emitters researched, including hysteresis-type effects, and has provided possible physical explanations of what must in detail be very complicated situations.

Fourth, the candidate has carried out work aimed at improving existing formulations of emission theory and the clarity with which they are formulated. One of these researches, initiated by the candidate but later carried out in collaboration with this reviewer, seems to have the potential of being highly important for the development of the subject area. This is because it should eventually (for the first time in over 90 years) enable effective testing of the details of theories of field electron emission. This methodology is based on the so-called empirical FE equation, which was first developed in the 1930s and (for an ideal emitter) writes the measured current  $I$  as a function of the measured voltage  $V$  in the form

$$I = CV^k \exp[-B/V],$$

where  $C$ ,  $B$  and  $k$  are in the first instance treated as constants. The candidate had the breakthrough idea that (given modern computing power) the best value of  $k$  for a given current-voltage data set could be found by carrying out multiple regressions for closely-spaced different values of  $k$ , and then selecting the best-fit value. By means of simulations, he and his group have shown that the best-fit value of  $k$  is extremely sensitive to the details of the emission theory being used. The value of  $k$  also depends on the shape of the emitter, so there is further simulation work to be done to establish the details of corrections that will need to be made. There is still a need for highly precise and well-characterised *stable* experimental data, so that the method can be usefully tested on real data, but the principle of the method has been clearly established by the simulations.

In addition, the candidate is (in my opinion) personally making a quiet but significant contribution to the international standardisation of descriptions of field electron emission theory. Russian FE science has traditionally been strong, particularly in Soviet times. However, related Russian scientific achievements (particularly theoretical ones) have not always got the international credit that they deserve. Further, particularly since the 1970s reforms in the international system of measurement, there has been some divergence between the methods used to describe FE theory in Russian-language and English-language literature. To a greater degree than many FE scientists of his generation employed in Russia, Dr Popov is working to widen the use of internationally standard practices.

For all these reasons, based on the results set out in the dissertation, and from personal knowledge of the candidate's work, I conclude that the dissertation work of Dr Eugeni Olegovich POPOV satisfies all the requirements of the Higher Attestation Commission for doctoral dissertations set forth

in the clauses of the "Regulations on the award of academic degrees" approved by the Government of the Russian Federation of September 24, 2013 No. 842, as explained to me. I conclude that the candidate, Dr Eugeni Olegovich POPOV, deserves to be awarded the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences (Speciality 01.04.04 – physical electronics), and that the award of the Degree would be well deserved and well justified.



(Dr) Richard G. Forbes  
MA, PhD, DSc, FInstP, FIET, SMIEEE  
Chartered Physicist (UK), Chartered Engineer (UK), European Engineer  
Foreign Member, Russian Academy of Natural Sciences

Visiting Reader (formerly Reader) In High Electric Field Nanoscience  
University of Surrey, Advanced Technology Institute

20 January 2021

E-mail: [r.forbes@surrey.ac.uk](mailto:r.forbes@surrey.ac.uk)