

КАТОДНЫЕ УЗЛЫ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНЕТРОНОВ – ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ

И. Ли, С. Калущин ork@pluton.msk.ru

В связи с существенным повышением требований к электрическим параметрам и сроку службы современных электровакуумных приборов СВЧ, в частности, импульсных магнетронов, возникают значительные затруднения в их обеспечении надежными и долговечными катодными системами. Каковы требования к таким катодам? Какие решения предлагаются для них сегодня?

В производстве современных магнетронов импульсного действия особое внимание уделяется задачам, связанным с созданием высокоэффективных и надежных катодно-подогревательных узлов (КПУ), отличающихся высокой стабильностью эмиссионных свойств в условиях интенсивной электронной бомбардировки и воздействия тех или иных внешних факторов. Не существует универсального катода, поэтому при выборе конструктивно-технологического варианта КПУ для конкретного типа магнетрона необходимо максимально учитывать все его особенности.

Сегодня в ОАО "Плутон" разрабатываются и серийно выпускаются самые разнообразные типы магнетронов, различающихся временем готовности, мощностью и частотой генерируемых электромагнитных колебаний. Поэтому в компании в 2009 году был сформирован специальный отдел разработки катодов, одна из задач которого – создание принципиально новых высокоэффективных катодов с управляемыми свойствами. В значительной степени эта задача уже решена. Разработаны и внедрены в серийное производство принципиально новые технологические процессы изготовления пресованных катодов, сотрудники отдела за последние шесть лет получили восемь патентов на изобретения и опубликовали более 50 научных статей.

Рассмотрим основные достижения по созданию катодных узлов для магнетронов различного типа.

МАГНЕТРОНЫ 2-мм ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Вплоть до 2010 года в магнетронах типа МИ-445 ($f_{\text{ген.}} \sim 150$ ГГц) компания "Плутон" применяла "катоде с керном" КРПГ. 433314.002 СБ, разработанные в начале 90-х годов прошлого столетия сотрудниками НПО "Исток" под руководством Б. Ч. Дюбуа [1]. В качестве эмиссионного материала в этих катодах используется сплав иридия с лантаном, отличающийся высокой устойчивостью к воздействию ионной и электронной бомбардировок и обладающий рядом достоинств:

- работа выхода электронов $\varphi \approx 2,69$ эВ;
- температурный коэффициент работы выхода электронов

$$\alpha = \frac{\partial \varphi}{\partial T} \approx 4 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/град};$$

- максимальный коэффициент вторичной электронной эмиссии $\approx 2,47$;
- диапазон рабочей температуры -1300 – 1900 К.

Следует отметить, что в результате замены пресованного вольфрам-алюминатного катода с объемным распределением осмия на иридий-лантано-вый катод срок службы магнетрона повысился в несколько раз – с 50–100 до 450–500 ч. Дальнейшее увеличение срока службы магнетронов стало возможным только после внедрения в серийное производство катода модернизированной конструкции, разработанного сотрудниками ОАО "Плутон" в 2009–2010 годах и предназначенного для использования в магнетроне типа "Прогресс" (аналог МИ-445), срок службы которого по ТУ должен превышать 1,5 тыс. ч. Задача была успешно решена в результате введения

ряда новшеств, которые позволили практически полностью устранить зазоры между эмиттером и керном катода, обеспечив тем самым наиболее благоприятные условия теплообмена между ними.

Особенность технологического процесса изготовления катода КРПГ.433314.002 СБ заключается в том, что заготовка эмиттера в виде шайбы прессуется отдельно от керна катода. Затем она собирается в специальной оснастке с керном и спекается в вакууме при температуре ~ 1900 °С с использованием молибденового груза весом ~ 100 г. При спекании происходит усадка эмиттера как в продольном, так и в поперечном направлениях, что приводит к возникновению зазоров на совместной цилиндрической и торцевой поверхностях эмиттера и керна катода (площадь зазора достигает ~ 20 – 25% от площади совместных поверхностей). Указанные зазоры приводят к нарушению условий отвода тепла с эмиттера, его перегреву (под воздействием электронной бомбардировки в режиме генерации магнетрона) и преждевременному выходу эмиттера и, соответственно, магнетрона из строя.

В одном из вариантов модернизированной конструкции катода проблема теплового контакта решена следующим образом: заготовка эмиттера напрессовывается непосредственно на керне катода, узел собирается с держателем катода и спекается в вакууме при температуре ~ 1900 °С в течение 10 мин. Для улучшения теплового контакта керн паяется к держателю катода припоем Ru-Mo при температуре ~ 1950 °С в течение ~ 1 мин. Как показали исследования шлифов, изготовленные в разных сечениях, в данной конструкции узла зазоры отсутствуют полностью

(рис.1). Следует отметить, что наряду с улучшением теплового контакта между эмиттером и керном увеличилась плотность тела эмиттера (с $16,5$ до $17,5$ г/см³), что, в свою очередь, позволило повысить стабильность эмиссионных свойств катода [2, 3].

Таким образом, в результате модернизации катода удалось кардинально повысить эффективность теплообмена между эмиттером и керном катода, создать более благоприятные условия для работы катода и прибора в целом. Срок службы магнетронов типа МИ-445 с модернизированной конструкцией катодного узла превысил 2000 ч, то есть увеличился более чем в пять раз.

Сегодня на предприятии проводятся исследования по оценке возможности создания мощных магнетронов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн с использованием составного катодно-подогревательного узла (рис.2). Принцип действия подобной конструкции КПУ заключается в следующем: запуск магнетрона в режим генерации обеспечивается током эмиссии с запускающих термоэлектронных (автоэмиссионных) эмиттеров, размещенных на концевых экранах КПУ, а режим генерации поддерживается вторичным эмиттером, изготовленным из металла или сплава со стабильными вторично-эмиссионными свойствами [4, 5, 6].

МАГНЕТРОНЫ С МГНОВЕННОЙ ГОТОВНОСТЬЮ

Магнетроны с мгновенной готовностью, созданные на предприятии "Плутон", являются наиболее востребованными. Катодные узлы таких магнетронов, или магнетронов с безнакальным запуском, состоят из комбинации чередующихся автоэлектронных

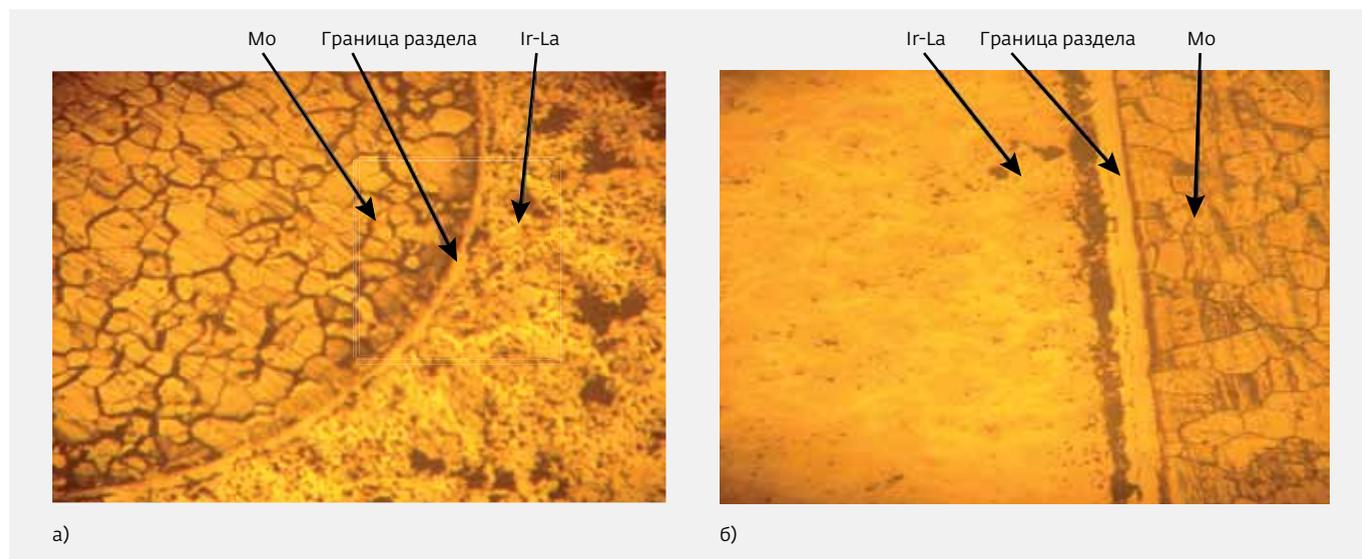


Рис.1. Граница раздела эмиттер-кern катода: а – поперечный шлиф, б – продольный шлиф

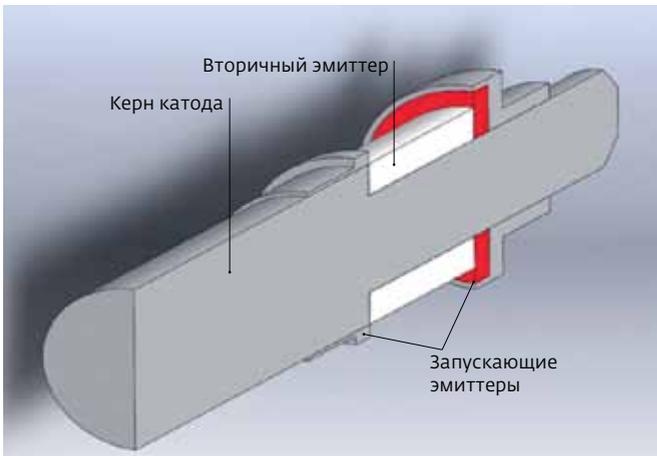


Рис.2. Схематическое изображение составного катодного узла

катодов (АЭК), изготовленных из танталовой фольги толщиной ~4 мкм, и вторично-эмиссионных катодов (ВЭК), изготовленных из специальных композиционных материалов с определенной структурой и свойствами [7, 8].

Детальные исследования, выполненные при разработке и выпуске подобных магнетронов, показали, что воспроизводимость их электрических параметров и срок службы зависят в первую очередь от свойств ВЭК, которые в условиях интенсивной ионной и электронной бомбардировки, наряду с сохранением своих вторично-эмиссионных параметров, должны обеспечивать непрерывное и стабильное активирование АЭК. Процесс активирования заключается в том, что испаренное из ВЭК активное вещество, например, барий, частично конденсируясь на рабочей поверхности АЭК, уменьшает работу выхода электронов и тем самым понижает потенциальный барьер. Благодаря этому, несмотря на сравнительно низкое значение напряженности электрического поля у поверхности АЭК ($E=5 \cdot 10^5$ В/см, например, у магнетрона МИ-463), ток полевой эмиссии повышается в тысячи раз. В частности, величина суммарного тока автоэлектронной эмиссии магнетрона МИ-463 возрастает от нескольких микроампер (до активирования АЭК) до ~10–15 мА (после их активирования).

Степень и стабильность активирования АЭК в значительной степени зависят от физических свойств ВЭК. Так, например, использовавшиеся в первых магнетронах оксидные и металлопористые вольфрам-алюминатные катоды (МПК), хотя и обеспечивали запуск приборов в режим генерации без накала катода, но имели следующий недостаток: по истечении нескольких десятков часов работы выходная

мощность снижалась и генерация срывалась. Позже в магнетронах с безнакальным запуском в качестве материала ВЭК использовались разнообразные композиционные соединения, которые в той или иной мере улучшали работу приборов, но не обеспечивали кардинального повышения их долговечности.

Использование сплава палладия с барием (ПДБ-2) в качестве материала ВЭК позволило существенно повысить стабильность электрических параметров и срок службы магнетронов с безнакальным запуском. Как оказалось, вторично-эмиссионные катоды из сплава палладия с барием в условиях электронной бомбардировки обеспечивают стабильное и непрерывное активирование АЭК. При этом вторично-эмиссионные свойства ВЭК, благодаря конгруэнтным (соразмерным) скоростям испарения палладия и бария, остаются практически неизменными [9]. Использование сплава палладия с барием в качестве материала ВЭК позволило, в сравнении с МПК, значительно повысить срок службы магнетронов с безнакальным запуском. Так, например, срок службы магнетронов типа МИ-463 увеличился со 100–200 до 5000 ч и более.

Однако, несмотря на достигнутые результаты, остались нерешенными несколько проблем, например необходимость длительной, многочасовой тренировки магнетронов в динамическом режиме и значительные флуктуации на переднем фронте огибающей импульсов. Более того, магнетроны с катодами, изготовленными из разных партий сплава, отличаются друг от друга по своим электрическим параметрам. Вероятно, это связано с технологическими особенностями производства пластин из сплава ПДБ-2. Действительно, при многократной прокатке выплавленного слитка через стальные валки до получения необходимой толщины пластин (0,5; 0,8; 1,0 мм) в сплав вносятся различные загрязнения, которые и могут приводить к нестабильной работе приборов. Следует также отметить, что использование сплава ПДБ-2 в производстве ВЭК крайне неэффективно. Во-первых, процесс изготовления пластин из сплава ПДБ-2 очень трудоемкий (изготовление пластины весом ~100 г с учетом промежуточных отжигов занимает не менее пяти рабочих смен); во-вторых, невозможно варьировать концентрацию бария в пластинах; в-третьих, коэффициент использования материала (КИМ) при производстве ВЭК крайне мал (не превышает 20%).

Кардинально повысить эксплуатационные параметры приборов удалось лишь в результате применения в магнетронах с безнакальным запуском пресованных палладий-бариевых катодов, разработанных в компании "Плутон" [10, 11] (см. таблицу). Среди

достоинств технологии изготовления прессованных палладий-бариевых катодов в условиях серийного производства следует отметить: простоту, надежность и управляемость процесса, высокую экономию палладия (КИМ не менее 70%) и др.

При исследовании процессов активирования катодных узлов с прессованными палладий-бариевыми катодами были получены феноменальные результаты. В ходе экспериментов катодный узел, в частности, в магнетроне типа МИ-463, активировался по специальному режиму: при определенной температуре и напряженности внешнего электрического поля. В результате были зафиксированы рекордные значения тока автоэлектронной эмиссии ~40–50 мА при импульсном напряжении ~3 кВ, в то время как ток автоэлектронной эмиссии при тех же условиях с аналогичного катода, но активированного по стандартной технологии, не превышает величины ~12–15 мА.

По предположению авторов, прессованные палладий-бариевые катоды, благодаря своим исключительным свойствам, таким как оптимальные пористость (~4–6%) и концентрация бария (~2–3%), высокая равномерность распределения компонентов (палладия и бария) и др., в интервале температур 1200–1250 К создают оптимальный поток испаренных с их поверхности палладия и бария. Конденсируясь на поверхности автоэлектронных катодов, находящихся в электрическом поле (~1·10³–5·10⁴ В/см), эти элементы формируют нитевидные кристаллы из палладия, частично или полностью покрытые атомами бария (рис.3) [12–15]. Автоэлектронная эмиссия с этих кристаллов, наряду с эмиссией с острых кромок АЭК, активированных барием, собственно

и обуславливает столь рекордные значения тока автоэлектронной эмиссии. Возможным условием возникновения и роста нитевидных кристаллов на поверхности АЭК является превалирование пондемоторного давления сил электрического поля $P_E = E^2/8\rho$ над лапласовым давлением капиллярных сил $P_\gamma = 2\gamma/r$ (γ – коэффициент поверхностного натяжения материала автоэлектронного катода; r – радиус кривизны дефектов на поверхности АЭК; E – напряженность электрического поля), то есть $P_E > P_\gamma$ или $E^2/8\rho > 2\gamma/r$.

Коэффициент поверхностного натяжения свободной поверхности тантала $\gamma_{Ta} = 2880$ мН/м, для палладия $\gamma_{Pd} = 1800$ мН/м. Примем радиус кривизны дефектов на тантале и палладии $r \sim 0,01$ мкм. Для тантала $P_\gamma = 2 \cdot 2,88 / 1 \cdot 10^{-8} = 5,76 \cdot 10^8$ Н/м², для Pd: $P_\gamma = 2 \cdot 1,8 / 1 \cdot 10^{-8} = 3,6 \cdot 10^8$ Н/м². Если условно принять $P_E = P_\gamma$, то для Ta: $E = 1,2 \cdot 10^5$ В/м, а для Pd: $E = 3 \cdot 10^4$ В/м. Таким образом, порог неустойчивости плоской формы автоэлектронного катода в момент формирования кристаллов преодолевается для палладия при более низкой напряженности внешнего электрического поля, чем для тантала. Этим подтверждается предположение, что вероятнее всего нитевидные структуры образованы кристаллами палладия.

Несомненно, результаты исследований по формированию разными способами автоэмиссионных структур на поверхности катодов, наряду с сугубо научным интересом, могут получить широкое практическое применение. Действительно, управляя ростом и направленностью нитевидных кристаллов, в перспективе можно будет создавать высокоэффективные катодные системы, которые могут быть использованы в самых разнообразных магнетронах

Сравнительные характеристики магнетрона МИ-463 с разными типами ВЭК

Материал вторично-эмиссионного катода магнетрона МИ-463	Выход годных магнетронов, %	Длительность тренировки магнетрона, ч	Срок службы магнетрона, ч
Металлопористый вольфрам-алюминатный катод (МПК)	Менее 20	Не менее 30 (с накалом катода)	~100
Вторично-эмиссионный катод из сплава ПдБ-2	45–50	~16–24 (как правило, с накалом катода)	Не менее 5000
Вторично-эмиссионный прессованный палладий-бариевый катод	75–80	~3–4 (как правило, без накала катода)	Не менее 5000

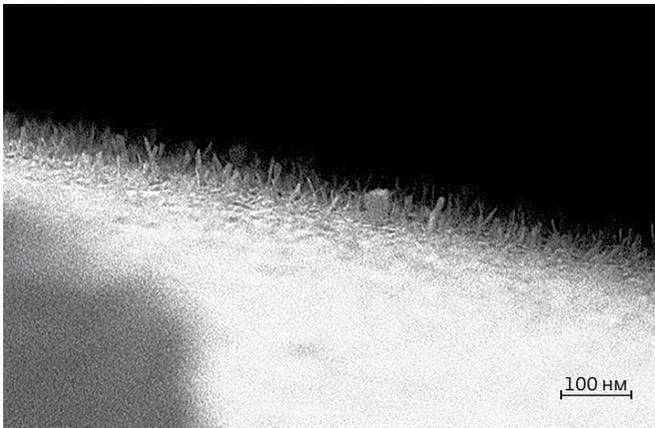


Рис.3. Нитевидные кристаллы из палладия и бария на поверхности танталовых автокатодов

миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

ПРЕССОВАННЫЕ ОКСИДНО-НИКЕЛЕВЫЕ КАТОДЫ

В большинстве импульсных магнетронов, выпускаемых компанией "Плутон", используются губчатые оксидно-никелевые катоды (ОК), технологический процесс изготовления которых сложен и неуправляем. В 2013 году на предприятии была выполнена поисковая работа с целью создания альтернативной технологии изготовления катодов, основные свойства (теплофизические, механические и эмиссионные) которых соответствовали бы свойствам ОК, выполненных традиционным способом [16-20].

В ходе исследований уже в конце 2013 года были изготовлены и испытаны с положительными результатами магнетроны с экспериментальными образцами прессованных оксидно-никелевых катодов. Их отличительные особенности состоят в следующем:

- физико-химические и эмиссионные свойства могут регулироваться пористостью катодов и содержанием в них эмиссионно-активного вещества: пористость катодов определяется режимами прессования и спекания их заготовок; концентрация эмиссионно-активного вещества зависит от состава смеси порошков никеля и тройного карбоната КТА-1-6, может варьироваться в широких пределах, вплоть до 20%;
- прессованные ОК изготавливают по методу порошковой металлургии, без связующего вещества, поэтому значительно уменьшается трудоемкость изготовления катодов, нет необходимости использовать химически активные и взрывчатые вещества. Кроме того, благодаря отсутствию продуктов

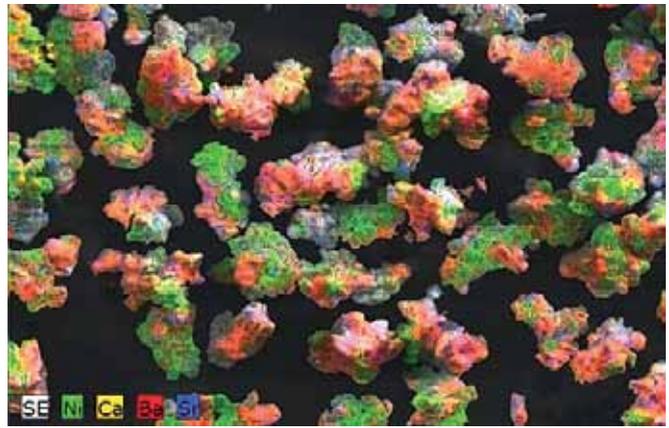


Рис.4. Микрофотография агломератов никеля с тройным карбонатом бария-кальция-стронция. Увеличение ~200x

разложения связующего вещества (тяжелых углеводородных соединений) снижается риск загрязнения внутривакуумных деталей и узлов соединениями, ухудшающими характеристики катодов и инициирующими межэлектродные пробой и искрения;

- благодаря наличию в технологическом процессе изготовления прессованного ОК финишной механической обработки достигается высокая точность геометрических размеров катодов;
- при изготовлении ОК по методу порошковой металлургии коэффициент использования дефицитного и дорогостоящего материала (тройного карбоната КТА-1-6) достигает 60-80% (при изготовлении катодов по принятой на предприятии технологии КИМ не превышает 5-10%).

Процесс изготовления прессованных ОК является технологичным и управляемым, а его внедрение позволит, с одной стороны, существенно повысить эффективность серийного производства электровакуумных приборов (магнетронов, ЛБВ, клистронов и др.) и, с другой – значительно увеличить их надежность и срок службы.

Один из способов дальнейшего повышения эмиссионной однородности прессованных оксидно-никелевых катодов – применение в них агломератов никеля с тройным карбонатом бария-кальция-стронция (рис.4), синтез которых является достаточно простым, доступным и управляемым [21].

В заключение отметим, что в данной статье приведена лишь небольшая часть исследований, выполняемых в компании "Плутон". Сегодня также ведутся работы по созданию высокоэффективных скандатных катодов с воспроизводимыми и регулируемым свойствами, исследуются пути создания специальных

комбинированных катодов со стабильными тепловыми, механическими и эмиссионными параметрами, разрабатываются методики измерения тепловых, автоэлектронных, термоэмиссионных и вторично-эмиссионных параметров катодов. В перспективе эти исследования позволят создать разнообразные конструктивно-технологические варианты катодных узлов, использование которых обеспечит достижение принципиально новых, улучшенных эксплуатационных характеристик современных электровакуумных приборов СВЧ-диапазона длин волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. ТУ 11-91, "Катод с керном", ТСО.352.092 ТУ, НПО "Исток", Москва, 1991 г.
2. **Ли И.П., Калужин С.В., Комиссарчик С.В.** Стратегия развития катодной техники в современных условиях на примере ОАО "Плутон" // Материалы XXI Научно-технической конференции по вакуумной науке и технике, 2014, с. 209-214.
3. **Ли И.П., Леденцова Н.Е., Поляков В.С., Силаев А.Д. и др.** Некоторые особенности конструирования катодных узлов для магнетронов импульсного действия с повышенной надежностью и сроком службы // Научное издание "Технологии", 2014, № 11, т. 15, с. 32-38.
4. **Ли И.П., Скрипкин Н.И., Поливникова О.В. и др.** Магнетрон с запускающими эмиттерами на концевых экранах катодных узлов. Патент на изобретение № 2529882. Приоритет изобретения: 18 августа 2011 г.
5. **Ли И.П., Скрипкин Н.И., Поливникова О.В. и др.** Магнетрон с запускающими автоэлектронными эмиттерами на концевых экранах катодных узлов. Патент на изобретение № 2538780. Приоритет изобретения: 22 июля 2013 г.
6. **Скрипкин Н.И., Лифанов Н.Д., Ли И.П., Шмелёв А.В.** "Магнетрон компактной конструкции с воздушным принудительным охлаждением". Патент на изобретение № 2539973. Приоритет изобретения: 20 июня 2012 г.
7. **Афанасьев В.А., Бондаренко Б.В., Копылов М.Ф. и др.** СВЧ-прибор М-типа. Авторское свидетельство № 1780444. Приоритет в СССР от 23.10.1977.
8. **Махов В.И., Бондаренко Б.В., Копылов М.Ф. и др.** СВЧ-прибор М-типа. Авторское свидетельство № 2040821. Приоритет в СССР от 11.04.1991.
9. **Семенов Л.А., Марголис Л.М., Есаулов Н.П. и др.** Магнетрон с безнакальным катодом. Патент РФ № 2019877. Приоритет 17.04.1991.
10. **Ли И.П., Поливникова О.В.** Прессованный катод // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2012, вып. 1, с. 21-24.
11. **Ли И.П., Дюбуа Б.Ч., Каширина Н.В. и др.** Магнетрон с безнакальным запуском. Патент РФ № 2380784 РФ, приоритет изобретения: 24 октября 2008 г.
12. **Ли И.П., Петров В.С., Васильевский В.В. и др.** Исследование процесса активирования прессованного палладий-бариевого катода магнетрона с безнакальным запуском // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012, вып.6 (98), с. 22-31.
13. **Ли И.П., Поляков В.С., Силаев А.Д., Петров В.С. и др.** Анализ современных представлений о синтезе наноразмерных эмиссионных гетероструктур на поверхности палладий-бариевого катода при активировании // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012, вып.3 (95), с. 19-25.
14. **Ли И.П., Комиссарчик С.В., Лифанов Н.Д.** Магнетрон с безнакальным запуском со специальным активированием автоэлектронных катодов // Патент РФ № 2494489, приоритет от 10 февраля 2012 г.
15. **Ли И.П., Петров В.С., Поляков В.С. и др.** Одновременное активирование автоэлектронного и вторично-эмиссионного катодов магнетрона с безнакальным запуском // Известия высших учебных заведений. Электроника, 2014, № 3 (107), с. 30-37.
16. **Рыбас К.П., Павлов В.К., Телепаев В.Н.** Применение прессованных губчатых оксидно-никелевых катодов для получения интенсивных электронных пучков // Приборы и техника эксперимента. 1971, № 2, с. 33-35.
17. **Довбня А.Н., Мартынов А.Н., Павлов В.К. и др.** Применение прессованных оксидно-никелевых катодов в мощных усилительных клистронах // Электронная техника. Сер. 1, Электроника СВЧ. 1981, вып. 11, с. 31-33.
18. **Худзий К.П., Петрушко Е.Л.** Исследование прессованных оксидно-никелевых катодов для ЭЛТ // Электронная техника. Сер. 4, Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1980, вып. 4, с. 30-31.
19. **Харитонов Н.Е., Ли И.П., Каширина Н.В., Минин А.А.** Исследование процессов прессования, спекания и химической обработки прессованных оксидно-никелевых катодов // Материалы XX Научно-технической конференции по вакуумной науке и технике, 2013, с. 246-248.
20. **Ли И.П., Харитонов Н.Е., Каширина Н.В. и др.** Прессованный оксидно-никелевый катод для малогабаритных магнетронов импульсного действия // Научно-технический отчет, М.: ОАО "Плутон", 2013.
21. **Ли И.П., Бажанов Ф.В., Калужин С.В. и др.** Магнетрон с прессованным оксидно-никелевым катодом // Заявка на изобретение РФ № 2014146931 от 24 ноября 2014 г.