

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ СИСТЕМЫ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ АКТИВАЦИЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСКРЕНИЙ В СЛОЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ

А.А. Щерба¹, чл.-корр. НАН Украины, Н.И. Супруновская², канд. техн. наук, С.Н. Захарченко³, канд. техн. наук, Н.А. Ломко⁴, канд. техн. наук, Н.И. Шевченко⁵, мл. науч. сотр.
1–5 – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Проведен анализ методов повышения энергоэффективности тиристорных электроразрядных систем объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) слоя металлических гранул, расположенных в слабо проводящей жидкости между электродами. Исследованы закономерности изменения коэффициента полезного действия (КПД) таких систем при изменении величины электрического сопротивления нагрузки и использовании в их цепях положительной обратной связи между напряжениями заряда и перезаряда конденсаторной батареи. Определены энергетически наиболее целесообразные режимы в зарядных и разрядных цепях электроразрядных систем с положительной обратной связью по напряжению и показаны области их применения. Обоснованы методы активации электрических искрений в слое гранул, использующие их принудительную электромеханическую вибрацию. Такой подход позволяет разрабатывать новые технологии получения наноразмерных электроэрозионных порошков и устойчивых коллоидных систем. Определены оптимальные диапазоны изменения емкости конденсатора и напряжения его заряда при такой электромеханической активации перемещения гранул. Библ. 12, рис. 6, таблица.

Ключевые слова: электрический разряд, конденсатор, тиристор, слой гранул, электроэрозия, нанопорошок, электровибрация, искрения, энергоэффективность.

Введение. Энергетическая эффективность полупроводниковых электроразрядных систем электропитания установок объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) слоя металлических гранул, расположенных в слабо проводящей жидкости между электродами, во многом определяется возможностью использования электрофизических закономерностей, направленных на активизацию основного электротехнологического процесса [1–5, 7, 8]. Технологии, использующие ОЭИД слоя гранул в жидкости, имеют большую перспективу получения наноструктурных порошковых материалов и коллоидных систем с уникальными свойствами [1, 2, 7–9, 11].

При создании полупроводниковых электроразрядных систем ОЭИД слоя металлических гранул эффективным является использование зависимости его электрического сопротивления от напряжения заряда конденсаторов. Известно, что с увеличением напряжения заряда конденсаторов сопротивление слоя гранул уменьшается и наоборот [1, 7, 8]. Но при использовании такой параметрической зависимости случайное изменение величины сопротивления электроискровой нагрузки вызывает изменение конечных условий процессов разряда и соответственно начальных и конечных условий последующего заряда конденсаторов. Это значительно усложняет стабилизацию параметров разрядных импульсов в нагрузке и расчет энергетических характеристик всей зарядно-разрядной системы.

Анализ энергетических режимов зарядных цепей конденсаторов исследуемых систем проводился в работах [1, 5, 7, 8], в которых были определены энергетически наиболее эффективные диапазоны регулирования параметров зарядных устройств и разрядных импульсов. В то же время анализ суммарных потерь в цепях полупроводниковых систем для ОЭИД металлических гранул практически не проводился.

Для активации электрических искрений в слое металлических гранул и уменьшения нестабильности процессов их ОЭИД в работах [2, 9, 12] предложено применять методы принудительной электромеханической вибрации гранул между электродами. При этом остались не исследованными диапазоны возможных изменений емкости накопительного конденсатора и напряжения его заряда.

Поэтому *целью данной работы* были исследование методов повышения энергоэффективности полупроводниковых электроразрядных систем объемного электроискрового диспергирования слоя металлических гранул между электродами в жидкости и анализ диапазонов возможных изменений емкости накопительного конденсатора и напряжения его заряда при принудительной электромеханической активации перемещения гранул для получения наноразмерных электроэрозионных порошков и устойчивых коллоидных систем.

Постановка задачи и обсуждение результатов. Электрическая схема тиристорного формирователя разрядных импульсов в электроискровой установке представлена на рис. 1.

Для достижения поставленной цели необходимо было исследовать изменение энергетических характеристик зарядных и разрядных цепей конденсаторов в полупроводниковых электроразрядных системах при изменяемых начальных и конечных напряжениях на их конденсаторах и случайных изменениях сопротивления нагрузки от разряда к разряду.

В схеме на рис. 1 после отпирания тиристора VT_1 происходит колебательный заряд конденсатора емкостью C от формирователя постоянного напряжения (ФПН) $U_{ФПН}$, а после включения тиристора VT_2 начинается колебательный разряд конденсатора на нагрузку R_n . Активные сопротивления R_1 и R_2 введены для оценки потерь электрической энергии в зарядной и разрядной цепях конденсатора, L_1 и L_2 – индуктивности зарядной и разрядной цепей (на практике обычно $L_1 \approx 100...300$ мкГн, $L_2 \approx 1...5$ мкГн, а $R_n < 1$ Ом). Использование колебательных процессов заряда и разряда конденсатора позволяет осуществлять быстрое естественное запирание тиристорных ключей VT_1 и VT_2 и реализовать в нагрузке достаточно высокую частоту разрядных импульсов тока (более 1 кГц). При реализации в контуре нагрузки добротности $Q_2 > 0,5$ разряд конденсатора будет колебательным и конденсатор будет перезаряжаться до напряжения $U_C(t = \tau_{имп}) < 0$ (где $\tau_{имп}$ – длительность разрядного импульса, которая обычно составляет 20...120 мкс) [1, 4, 7, 10].

Если в схеме, приведенной на рис. 1, имеют место только колебательные заряд и разряд конденсатора посредством поочередного включения тиристорных VT_1 и VT_2 , то во всех разрядных циклах, начиная со второго, колебательный заряд будет осуществляться при начальном отрицательном напряжении на конденсаторе (по отношению к напряжению на выходе ФПН). При анализе переходных процессов в цепях конденсатора допускалось, что коммутация тиристорных ключей происходила при мгновенном изменении их сопротивления от бесконечности – в закрытом состоянии до нуля – в открытом состоянии, и рассеяние электрической энергии на таких ключах равнялось нулю.

КПД зарядной цепи η_z при колебательном заряде конденсатора от ФПН определяется по формуле [5, 7]

$$\eta_z = \frac{W_C}{W_{ФПН}} = \frac{[1 + \beta \cdot \exp(-\pi/2Q_1)]^2 - (1 - \beta)^2}{2 \cdot \beta \cdot (1 + \exp(-\pi/2Q_1))}, \quad (1)$$

где W_C – доза энергии, поступающая в конденсатор; $W_{ФПН}$ – доза энергии, отбираемая от ФПН за время заряда конденсатора; $\beta = 1 - U_{0CC}/U_{ФПН}$; U_{0CC} – начальное напряжение на конденсаторе при его очередном заряде, которое определяется минимальным (так как оно отрицательно) напряжением, до которого разряжается конденсатор в предыдущем цикле; $Q_1 = \sqrt{L_1}/\sqrt{C \cdot (R_n + R_1)}$ – добротность зарядной цепи.

Выражение для КПД разрядной цепи η_p при колебательном разряде конденсатора на линейную нагрузку имеет вид

$$\eta_p = \frac{W_n}{W_n + W_2} = \frac{\int_0^{\tau_{\text{имп}}} R_n \cdot i_p^2(t) dt}{\int_0^{\tau_{\text{имп}}} (R_n + R_2) \cdot i_p^2(t) dt} = \frac{R_n}{R_n + R_2}, \quad (2)$$

где W_n – энергия, рассеиваемая в нагрузке; W_2 – энергия, рассеиваемая в активных элементах разрядного контура (на сопротивлении R_2); $i_p(t)$ – ток в разрядной цепи.

Для КПД всей системы $\eta_{\text{сист}}$ можно записать

$$\eta_{\text{сист}} = \eta_z \cdot \eta_p. \quad (3)$$

Поскольку в данной системе реализуется положительная обратная связь по напряжению, то случайное увеличение перезаряда конденсатора будет вызывать повышение напряжения заряда конденсатора в каждом последующем цикле. Однако проведенные исследования показали, что величина прироста напряжения заряда конденсатора с каждым циклом убывает и стремится к нулю. Следовательно, после достаточно большого количества зарядно-разрядных циклов можно утверждать, что происходит стабилизация напряжения заряда конденсатора. При этом граничное напряжение перезаряда конденсатора и соответственно начальное напряжение на нем при последующем заряде U_{0C3} будет определяться выражением [7, 10]

$$U_{0C3} = - \frac{U_{\text{ФПН}} \cdot [1 + \exp(-\pi/2Q_1 \cdot A_1)]}{1 - \exp\left[\frac{-\pi}{2} \left(\frac{1}{Q_1 A_1} + \frac{1}{Q_2 A_2}\right)\right]} \cdot \exp\left(\frac{-\pi}{2Q_2 \cdot A_2}\right), \quad (4)$$

где $Q_2 = \sqrt{L_2} / \sqrt{C \cdot (R_n + R_2)}$ – добротность разрядной цепи; $A_1 = \sqrt{1 - 1/4Q_1^2}$; $A_2 = \sqrt{1 - 1/4Q_2^2}$.

Аналогично граничное напряжение заряда конденсатора, соответствующее начальному напряжению U_{0Cp} его последующего разряда, можно определить по формуле [4, 7]:

$$U_{0Cp} = \frac{U_{\text{ФПН}} [1 + \exp(-\pi/2Q_1 \cdot A_1)]}{1 - \exp\left[\frac{-\pi}{2} \left(\frac{1}{Q_1 A_1} + \frac{1}{Q_2 A_2}\right)\right]}. \quad (5)$$

Для расчетов было выбрано: напряжение ФПН $U_{\text{ФПН}} = 500$ В; емкость конденсатора $C = 10^{-4}$ Ф; индуктивность $L_1 = 3 \cdot 10^{-4}$ Гн; сопротивление $R_1 = 0,0075$ Ом, что соответствовало добротности $Q_1 = 20$; $0,02$ Ом $< R_n < 0,1$ Ом; индуктивность $L_2 = 5 \cdot 10^{-6}$ Гн, сопротивление $R_2 = 0,005$ Ом, что для добротности Q_2 соответствовало $0,7 < Q_2 < 1,4$. Анализ режимов в электрических цепях проводился с использованием программного пакета MathCAD 12.

На рис. 2 представлено влияния величины сопротивления R_n на установившиеся значения начальных напряжений на конденсаторе – при его заряде U_{0C3} (нижняя кривая на рис. 2 а) и разряде – U_{0Cp} (верхняя кривая на рис. 2 а), а также на КПД η_z , η_p и $\eta_{\text{сист}}$ (рис. 2 б).

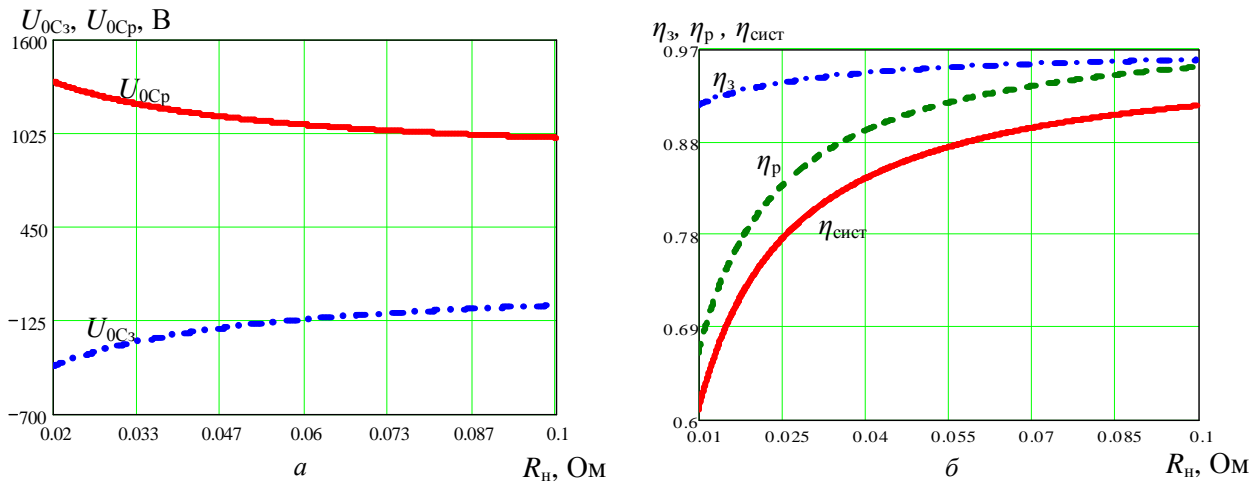


Рис. 2

В таблице приведены значения КПД $\eta_з$, η_p и $\eta_{сист}$ при изменении R_n от 0,090 до 0,021 Ом.

R_n , Ом	0,090	0,053	0,029	0,021
Q_2	0,73	0,93	1,21	1,40
U_{0C3} , В	-50,8	-149,6	-299,8	-399,6
U_{0Cp} , В	1009	1101	1239	1332
$\eta_з$	0,96	0,95	0,94	0,93
η_p	0,95	0,91	0,85	0,81
$\eta_{сист}$	0,91	0,87	0,80	0,75

Из данных таблицы и зависимостей на рис. 2 видно, что с уменьшением сопротивления R_n и соответственно увеличением добротности Q_2 , напряжение последующего заряда конденсатора и соответственно начальное напряжения при его разряде будут возрастать до величины, которая может превышать напряжение $U_{ФПН}$ в 2,6 раза и более. Если сопротивление R_n уменьшится в 4,4 раза (до граничного значения в исследуемом диапазоне), то добротность Q_2 увеличится в 1,93 раза, КПД зарядной и разрядной цепей конденсатора снижаются соответственно на 3 и 18 %, а КПД всей установки – на 32 %.

Анализируя данные таблицы можно сделать вывод, что если при изменении R_n происходит перезаряд конденсатора до напряжения, не превышающего $0,3U_{ФПН}$, то КПД будут $\eta_з \geq 0,95$, $\eta_p \geq 0,91$, $\eta_{сист} \geq 0,87$. Если же сопротивление R_n уменьшится до значения, при котором конденсатор перезарядится до напряжения, равного $0,4U_{ФПН}$, то КПД η_p и $\eta_{сист}$ уменьшатся до значений $\eta_p = 0,8$, $\eta_{сист} = 0,75$. Такие значения КПД $\eta_з$, η_p , $\eta_{сист}$ были признаны гранично допустимыми. В соответствии с этим допущением энергоэффективными были признаны режимы в электроразрядной системе, при которых конденсатор перезаряжается до напряжений, не превышающих $0,4U_{ФПН}$.

Известно, что уменьшению размеров электроэрозионных частиц при ОЭИД слоя металлических гранул в слабо проводящей жидкости между электродами способствует повышение скорости подвода электрической энергии к электродам и уменьшение длительности импульсного тока в межэлектродном промежутке [1, 7, 8, 11]. Вероятно, аналогичный вывод можно сделать относительно скорости подвода электрической энергии к искрящему контакту между гранулами и длительности импульсного тока в этом контакте. На практике для повышения скорости подвода энергии в электроискровую нагрузку обычно применяют повышение напряжения заряда накопительного конденсатора, уменьшение индуктивности и активного сопротивления разрядного контура [1, 7]. Однако такой подход имеет большие ограничения, поэтому разработка новых методов уменьшения длительности импульсных токов через электри-

ческие искрящие контакты между металлическими гранулами является актуальной и важной научно-технической задачей.

Метод электромеханической активации электрических искрений в слое между гранулами. Данный метод является развитием известного метода ОЭИД слоя гранул между электродами слабо проводящей жидкости [1, 7, 8].

Метод реализован электротехнологической установкой, представленной на рис. 3.

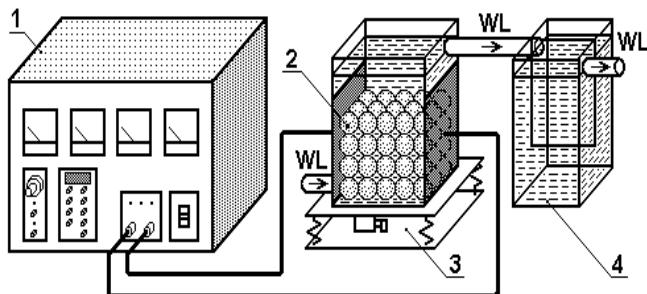


Рис. 3

Основными блоками установки являются: тиристорный генератор разрядных импульсов (ГРИ, поз. 1 на рис. 3), технологический аппарат диспергирования (ТАД) слоя гранул (поз. 2) и седиментационный бак (поз. 4), в котором электроэрозионный порошок через некоторое время выпадал в осадок.

Для уменьшения размеров получаемых электроэрозионных порошков было предложено закреплять ТАД на вибростоле (поз. 3 рис. 3), с применением которого слой

гранул подвергался электромеханическому вибрационному воздействию [2, 9, 1]. Такое воздействие на металлические гранулы вызывало их "вспушивание", то есть увеличение высоты слоя гранул и амплитуд их перемещений относительно друг друга. Это приводило к активации искрений на токопроводящих контактах между гранулами, уменьшению длительности протекающих импульсных токов и уменьшению размеров образующихся электроэрозионных порошков.

Оборудование, материалы и методика эксперимента. В состав лабораторного стенда входили: ГРИ с емкостным накопителем энергии, его блок управления, разрядные камеры, вибрационный стол, а также запоминающий осциллограф С8-17, снабженный измерительными высокочастотными трансформатором тока и делителем напряжения 1:10.

Электрическая схема ГРИ представлена на рис. 4. ГРИ состоял из управляемого выпрямителя (VD_1, VD_2, VS_1, VS_2), который, питаясь от однофазной сети напряжением 220 В частотой 50 Гц, обеспечивал регулируемое и стабилизированное постоянное напряжение на опорной батарее конденсаторов C_Φ , а также из формирователя разрядных импульсов (ФРИ). Основными элементами силовой части ФРИ являлись: зарядный и разрядный тиристоры (VS_3 и VS_4), катушка индуктивности зарядного контура L_1 , батарея конденсаторов, суммарная емкость C которых дискретно регулировалась в диапазоне от 3,8 до 600 мкФ. Индуктивность соединительных кабелей разрядного контура L_2 составляла около 1 мкГн. Тиристоры работали в режиме естественной коммутации. Электроискровая нагрузка обозначена нелинейным резистором R_L .

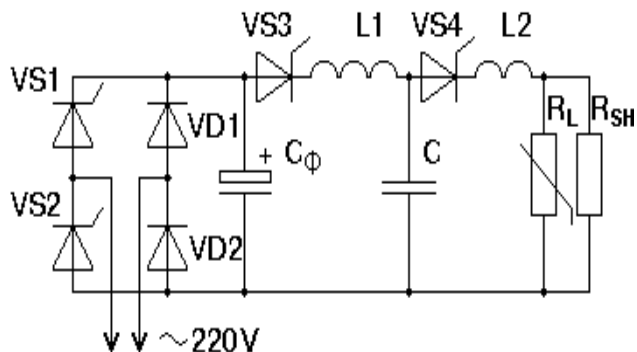


Рис.4.

Для уменьшения влияния неустойчивости эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул на параметры разрядных импульсов разрядная камера была зашунтирована резистивной нагрузкой сопротивлением 3 Ом, собранной из безиндуктивных резисторов типа ТВО (R_{SH} на рис. 4). Это обеспечивало нулевые начальные условия зарядки рабочего конденсатора при изменении эквивалентного сопротивления слоя в широких пределах. Все соединения в разрядном контуре выполнялись многожильным высокочастотным кабелем-литцендратом с диаметром одной жилы 0,4 мм.

Для уменьшения влияния неустойчивости эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул на параметры разрядных импульсов разрядная камера была зашунтирована резистивной нагрузкой сопротивлением 3 Ом, собранной из безиндуктивных резисторов типа ТВО (R_{SH} на рис. 4). Это обеспечивало нулевые начальные условия зарядки рабочего конденсатора при изменении эквивалентного сопротивления слоя в широких пределах. Все соединения в разрядном контуре выполнялись многожильным высокочастотным кабелем-литцендратом с диаметром одной жилы 0,4 мм.

Вибрационный стол состоял из двух плоскостей, соединенных между собой пружинами и двигателя постоянного тока типа Д-25Г с жестко закрепленным на валу эксцентриком. Двигатель жестко крепился к верхней плоскости стола, на которую устанавливались разрядные камеры. Частота принудительной вибрации f_B выбиралась из условия резонанса механических колебаний гранул в слое и составляла 92 Гц для меньшей и 86 Гц для большей разрядных камер.

Межэлектродное расстояние обеих разрядных камер составляло 52 мм. Ширина межэлектродного промежутка b меньшей камеры составляла 24 мм, а большей – 60 мм. Электроды были выполнены из листового алюминия толщиной 5 мм марки А0. В опытах использовались гранулы алюминия марки АЕ, имеющие форму, близкую к сферической, диаметром 3,5 мм, прошедшие предварительную электроискровую обработку поверхности. Высота их слоя составляла 25 мм. В качестве рабочей жидкости использовалась вода.

Для каждого значения емкости батарей рабочих конденсаторов из ряда 3,8, 12,5, 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 и 600 мкФ определялись минимальное и максимальное усредненные значения амплитуд напряжения разрядных импульсов U_m при условии устойчивой работы системы в режимах с принудительной механической активацией и без нее. Частота следования разрядных импульсов составляла при этом 25 Гц.

Критерием устойчивой работы являлось наличие излучения искровых каналов в слое гранул в видимой части спектра при отсутствии аварийных режимов в течение не менее 60 с. Данное значение времени выбиралось из условия обеспечения наработки одной порции ультрадисперсного гидрозоля металла с концентрацией частиц 5 мг/л, которое составляло 40 с.

Результаты и их анализ. Области устойчивой работы оборудования в вольт-фарадной плоскости для малой разрядной камеры ($b = 24$ мм) представлены на рис. 5 а. Цифрой 2 (граница – линия с треугольниками) обозначена область устойчивой работы в режиме с принудительной механической активацией слоя, а цифрой 1 (граница – линия с кружочками) – в режиме без нее. Аналогично на рис. 5 б обозначены области устойчивой работы оборудования с большей ($b = 60$ мм) разрядной камерой в режимах с принудительной механической активацией и без нее.

Из рис. 5 видно, что применение принудительной механической активации слоя гранул алюминия в процессе их объемного электроискрового диспергирования расширяет область устойчивой работы оборудования как с меньшей (рис. 5 а, $b = 24$ мм), так и с большей (рис. 5 б, $b = 60$ мм) разрядными камерами.

Особенно данное расширение заметно в области низких напряжений (до 50 % по напряжению), что может быть вызвано улучшением условий искрообразования за счет механического разрушения поверхностных пленок гранул с низкой электропроводностью, а также периодическим увеличением площади контактов за счет микросоударений гранул.

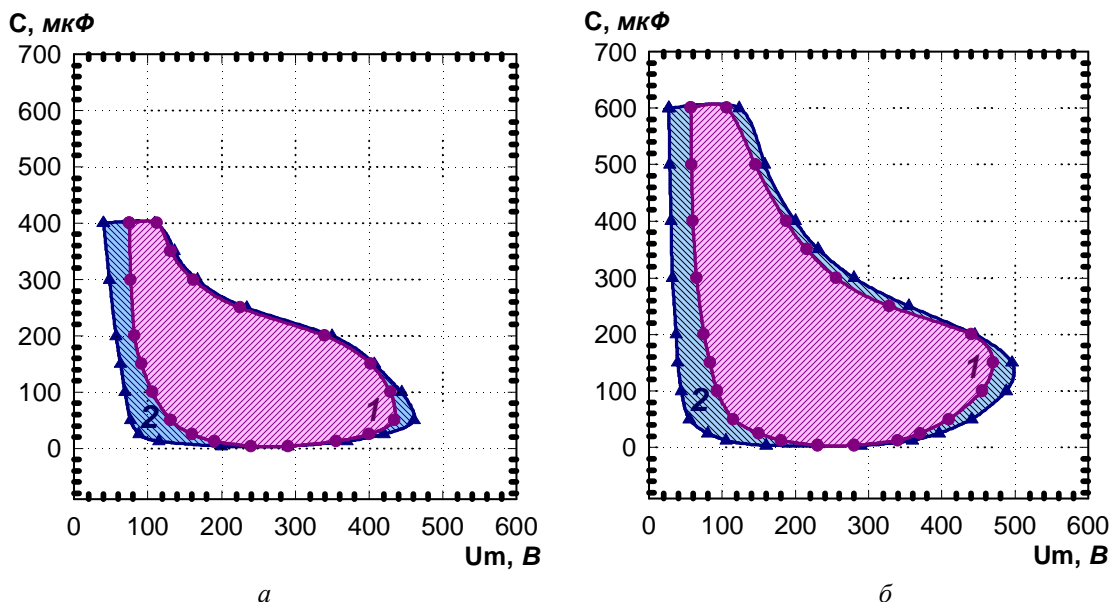
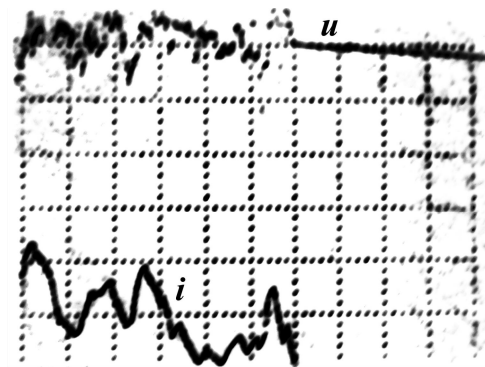


Рис. 5

Работа оборудования в режиме с принудительной механической активацией слоя гранул при низких напряжениях разрядных импульсов (вблизи границы области устойчивости) имеет ряд особенностей.

Как видно из осциллограмм, напряжения на нагрузке и тока в ней, приведенных на рис. 6 для режима с вибрацией при: $C = 200$ мкФ; $U_m = 130$ В; $f_B = 92$ Гц; $b = 24$ мм [9], импульс тока подвержен высокочастотной модуляции с периодом около 20 мкс. При этом значения тока в локальных инфинимумах соизмеримы со значениями токов удержания мощных тиристоров типа ТБ.

Поскольку длительность полупериода модуляции существенно меньше времени запирающего тиристора, то в течение полной длительности импульса тока тиристор оставался открытым. Значения тока в локальных экстремумах не превышало 30 А, что обуславливает ограничение энергии импульсов, а следовательно, объема расплавленной фракции металла гранул и размера искроэрозийных частиц. В данном режиме получаются самые мелкие (среднее значение диаметра до 100 нм) искроэрозийные частицы Ag, Cu и Fe [2, 12]. Напряжение импульсов в данном режиме на протяжении всей их длительности меняется незначительно (менее 20 %), что способствует уменьшению разброса мощности отдельных мод тока:



i : 11,6 А/дел; u : 20 В/дел; t : 10 мкс/дел;

Рис. 6

$$P_M = \frac{1}{\tau_M} \int_0^{\tau_M} u(t) \cdot i(t) dt, \quad (6)$$

где τ_M – длительность моды тока, с; $u(t)$ – зависимость от времени напряжения на нагрузке, В; $i(t)$ – зависимость от времени тока нагрузки, А.

Уменьшение разброса мощности отдельных мод разрядного тока (6), в свою очередь, способствует повышению однородности размеров и структурно-фазового состояния искроэрозийных частиц [2, 12]. Кроме того, при практически постоянном напряжении разрядного импульса скорость нарастания его мощности будет в основном определяться лишь скоростью нарастания тока, что повышает динамику импульсов и способствует снижению размеров искроэрозийных частиц. Во многом данная особенность обусловлена характером зависимости эквивалентного сопротивления искрового канала от протекающего в нем тока, которая с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть аппроксимирована функцией [6]:

$$r(i) = R_0 + E/i, \quad (7)$$

где R_0 – параметр аппроксимации, имеющий физический смысл омической составляющей сопротивления разрядного контура, Ом; E – параметр аппроксимации, имеющий физический смысл напряжения эквивалентного источника противоЭДС искровых каналов, В.

В режимах, когда напряжение разрядных импульсов лишь незначительно превосходит параметр аппроксимации E (7), условия для высокочастотной модуляции разрядного тока, повышения скорости нарастания мощности отдельных его мод и ограничения ее общей величины – наиболее благоприятны. Следовательно, вероятность получения наиболее мелких искроэрозионных частиц в данном режиме велика.

При больших значениях напряжения разрядных импульсов, особенно при малых значениях емкости рабочих конденсаторов (до 150 мкФ), использование принудительной механической активации слоя также незначительно (до 10 % по напряжению) расширяет область устойчивой работы оборудования. Это может быть вызвано возрастанием эквивалентного электрического сопротивления слоя гранул в результате их принудительной механической активации:

$$R_E = \int_0^{\tau} u(t) \cdot i(t) dt \Big/ \int_0^{\tau} i^2(t) dt, \quad (8)$$

где τ – длительность импульса тока, с.

В работе [9] показано, что возрастание эквивалентного электрического сопротивления (3) слоя гранул алюминия при их электроискровом диспергировании в режиме резонанса механических колебаний может составлять от 25 до 45 % своего значения в режиме без вибрации. Рост сопротивления (8) неизбежно приводит к уменьшению разрядного тока, мощности импульса, а значит, и динамического воздействия на гранулы, которое заставляет их разлетаться и уменьшает число электрических контактов к моменту прихода следующих импульсов, что вносит нестабильность в работу оборудования.

При значениях емкости рабочих конденсаторов в пределах 100...200 мкФ и амплитудах напряжения разрядных импульсов свыше 350 В, характер разряда в описанных слоях гранул, как правило, колебательный. Дальнейшее увеличение напряжения импульсов приводит к снижению эквивалентного сопротивления слоя, рассчитываемого как по выражению (7), так и по (8) и росту добротности разрядного контура:

$$Q = \sqrt{L_2 / \left(C \cdot (R_E \cdot R_{SH} / (R_E + R_{SH}))^2 \right)}. \quad (9)$$

Работа описанного генератора при высоких значениях добротности разрядного контура приводит к резонансному увеличению напряжений и токов и возникновению аварийных режимов. С этим связано ограничение области устойчивой работы по напряжению. Применение вибрации способствует увеличению эквивалентного сопротивления слоя (8) и снижению добротности разрядного контура (9), что позволяет незначительно расширить область устойчивой работы по напряжению при низких значениях емкости рабочих конденсаторов.

При больших значениях емкости рабочих конденсаторов (200...600 мкФ) добротность разрядного контура (9) меньше, что снижает вероятность резонансных явлений. В данном диапазоне значений емкости при высоких напряжениях энергия разрядных импульсов велика и незначительное увеличение эквивалентного сопротивления слоя (8), вызванного вибрацией, не имеет решающего значения для уменьшения динамического воздействия на гранулы. Вот почему границы областей устойчивой работы для обоих режимов в данном интервале практически совпадают.

Из сравнения областей устойчивой работы для меньшей ($b = 24$ мм) и большей ($b = 60$ мм) разрядных камер (рис. 5) следует, что в большей камере данные области шире, особенно при больших значениях емкостей конденсаторов и напряжений импульсов. Вероятно, это является следствием наличия большего числа контактов между гранулами, что способствует уменьшению плотности тока при больших значениях импульсной мощности (6) за счет

его перераспределения между ними. Это приводит к уменьшению динамических воздействий на отдельные гранулы и расширению области устойчивой работы.

Расширение области устойчивой работы системы с большей камерой в сторону низких напряжений также вызвано увеличением числа параллельно включенных контактов. Это повышает вероятность пробоя поверхностных пленок гранул с повышенным сопротивлением хотя бы в одном контакте из множества параллельно включенных.

Выводы. 1. Реализация положительной обратной связи между зарядным и перезарядным напряжениями конденсатора в полупроводниковых электроразрядных системах объемного электроискрового диспергирования слоя металлических гранул, расположенных в слабо проводящей жидкости между электродами, может обеспечивать повышение напряжения заряда накопительных конденсаторов и энергоэффективное регулирование режимов таких систем.

При изменении величины сопротивления нагрузки напряжение перезаряда конденсатора изменяется в соответствии с формулой (4), вызывая изменение напряжения его заряда в последующем цикле в соответствии с формулой (5). Величина прироста напряжения заряда (разряда) конденсатора с каждым циклом уменьшается и при достаточно большом количестве зарядно-разрядных циклов стремится к нулю, то есть происходит стабилизация зарядного и разрядного напряжений конденсатора в системе.

2. С увеличением добротности разрядной цепи (вследствие уменьшения сопротивления нагрузки) напряжение перезаряда конденсатора и напряжение его последующего заряда также будут увеличиваться. При этом напряжение заряда конденсатора может превышать напряжение ФПН в 2,6 раза и более.

При уменьшении сопротивления нагрузки в 4,4 раза и соответственно увеличении добротности разрядной цепи в 1,93 раза, КПД зарядной и разрядной цепей конденсатора снижаются соответственно на 3 и 18 %, а КПД всей установки – на 32 %.

3. Для реализации высокой энергоэффективности установки (КПД не менее 0,9) необходимо реализовать такую добротность разрядной цепи, чтобы абсолютное значение перезарядного напряжения конденсатора при его разряде на нагрузку не превышало 40 % от напряжения ФПН.

4. Применение принудительной механической активации слоя алюминиевых гранул в процессе их электроискрового диспергирования расширяет область устойчивой работы оборудования, особенно в направлении снижения напряжения импульсов как для больших, так и для малых разрядных камер.

Особенности зависимости эквивалентного сопротивления объемной электроискровой нагрузки от разрядного тока позволяют осуществлять его высокочастотную модуляцию принудительной вибрацией слоя гранул при низких напряжениях импульсов.

5. Использование вибрации слоя алюминиевых гранул при низких значениях напряжения разрядных импульсов и больших значениях емкости рабочих конденсаторов в процессе объемного электроискрового диспергирования позволяет повысить скорость нарастания импульсной мощности, сохраняя низкие значения энергии мод тока, что способствует уменьшению размеров искроэрозионных частиц.

1. Асанов У.А., Цой А.Д., Щерба А.А., Казекин В.И. Электроэрозионная технология химических соединений и порошков металлов (главы 2 и 3). – Фрунзе: Илим, 1990. – 255 с.
2. Лопатько К.Г., Афтандиянц Е.Г., Щерба А.А., Захарченко С.Н., Победаш К.К., Святненко В.А. Синтез ультра- и наноразмерных частиц биогенных металлов методом объемного электроискрового диспергирования // Наук. вісн. НУБіПУ. – Київ: НУБіПУ. – 2010. – Вип. 144. – Ч.2. – С. 40–48.
3. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – К.: Наук. думка, 1982. – 424 с.
4. Супруновская Н.И. Переходные процессы при разряде конденсатора на электроискровую нагрузку и ограничении длительности протекающих в ней импульсных токов // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 5. – С. 20–26.

5. Супруновская Н.И. Энергетические характеристики при изменении начальных условий колебательного заряда конденсатора от источника постоянного напряжения // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 4. – С. 27–33.
6. Филиппов Е. Нелинейная электротехника. – М.: Энергия, 1976. – 496 с.
7. Шидловский А.К., Щерба А.А., Супруновская Н.И. Энергетические процессы в электроимпульсных установках с емкостными накопителями энергии. – К.: Интерконтиненталь-Украина, 2009. – 208 с.
8. Щерба А.А. Тиристорные системы электропитания технологических установок с параметрической стабилизацией выходных характеристик // Преобразование и стабилизация параметров электрической энергии. – К.: Изд. ИЭД НАНУ, 1996. – С. 18–27.
9. Щерба А.А., Захарченко С.Н., Яцюк С.А., Лопатько К.Г., Афтанділянц Е.Г., Святненко В.А. Развитие систем получения ультрадисперсных искроэрозионных порошков: влияние вибрации на параметры разрядных импульсов и характеристики продукции // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Ч.4. – С. 107–112.
10. Щерба А.А., Супруновская Н.И., Иващенко Д.С. Анализ импульсных процессов при многократных зарядно-разрядных циклах конденсатора в цепях с электроискровой нагрузкой // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Мат. МНК (17–21 августа 2009). – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2009. – С. 189–191.
11. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Zakharchenko S.N., Kucheryavaya I.N., Shevchenko N.I., Suprunovska N.I. Progress in spark-eroded particle production: development of technological system for high-yield electrical-spark dispersion of metal granules in liquid // Техн. електродинаміка. – 2005. – № 6. – С. 3–13.
12. Пат. № 46147 Україна МПК В 22 F 9/00. Спосіб на отримання ультрадисперсного порошку / К.Г. Лопатько, С.Г. Афтанділянц, А.А. Щерба, С.М. Захарченко, Ю.С. Нікітенко / Заявка Нац. ун-ту біоресурсів і природокористування України. Опубл. 10.11.2009. Бюл. №21, 2009.

УДК 621.311

А.А. Щерба¹, чл.-кор. НАН України, Н.І. Супруновська², канд. техн. наук, С.М. Захарченко³, канд. техн. наук, М.О. Ломко⁴, канд. техн. наук, М.І. Шевченко⁵, мол. наук. співроб.

1–5 – Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Енергоэффективні напівпровідникові електророзрядні системи з примусовою активацією електричних іскрін у шарі металічних гранул

Проведено аналіз методів підвищення енергоефективності тиристорних електророзрядних систем об'ємного електроіскрового диспергування (ОЕИД) шару металевих гранул, розташованих у слабко провідній рідині між електродами. Досліджено закономірності зміни коефіцієнта корисної дії (ККД) таких систем при зміні величини електричного опору навантаження й використанні в їхніх колах позитивного зворотного зв'язку між напругами заряду й перезаряду конденсаторної батареї. Визначено енергетично найбільш доцільні режими в зарядних і розрядних колах електророзрядних систем з позитивним зворотним зв'язком за напругою та показано сфери їхнього застосування. Обґрунтовано методи активації електричних іскрін у шарі гранул, що використовують їх примусову електромеханічну вібрацію. Такий підхід дає змогу розробляти нові технології одержання нанорозмірних електроерозійних порошків і стійких колоїдних систем. Визначено оптимальні діапазони зміни ємності конденсатора й напруги його заряду при такій електромеханічній активації переміщення гранул. Бібл. 12, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: електричний розряд, конденсатор, тиристор, шар гранул, електроерозія, нанопорошок, електровібрація, іскріння, енергоефективність.

A.A. Shcherba¹, N.I. Suprunovskaya², S.N. Zakharchenko³, N.A. Lomko⁴, N.I. Shevchenko⁵

1–5 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Energy efficient semiconductor electrodischarge systems with forced activation of electrical sparks in metal granular layer electrotechnological installation of metal treatment

The analysis of methods for increasing of energy efficiency of thyristor electro-discharge systems for volumetric electro-spark dispersion (VESD) of metal granular layer located in weakly conducting liquid between is carried out. Regularities of change efficiency factor (EF) such systems at changing of value of load electrical resistance as well as at using positive feedback between charge and recharge voltages of capacitor bank are studied. The most energy-expedient regimes in charge-discharge circuits of the electro-discharge systems with positive feedback in voltage are determined and area its application is shown. Optimal changing ranges for value of capacitor and its charge voltage during such mechanical activation of granules moving are determined. References 12, figures 6, table.

Key words: electrical discharge, capacitor, thyristor, granular layer, electro-erosion, nano-powder, electro-vibration, sparking, energy efficiency.

Надійшла 31.05.2011
Received 31.05.2011