

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.315.592

С.М. Карабанов, Д.В. Суворов, Б.Н. Сажин, Е.В. Сливкин**ОЧИСТКА КРЕМНИЯ МЕТОДОМ ЭКСТРАКЦИИ
ИЗ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ**

Целью работы является создание усовершенствованной математической модели процесса очистки кремния методом экстракции из твердой фазы, расчет с её использованием различных режимов диффузии примесей и количественное определение основных параметров технологического процесса, при которых достигается высокая эффективность очистки. В расчетах рассматривалась диффузия основных примесей, определяющих качество солнечного кремния – бора, фосфора, алюминия, углерода, железа и меди. В работе представлены данные о распределении концентрации примесей по сечению частиц в различные моменты времени, динамика изменения средней концентрации каждой из примесей во времени при различных условиях – температуре, диаметре частиц, различных соотношениях объемов кремния и вещества-экстрагента. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования представленной технологии для промышленной очистки кремния с целью получения кремния для солнечной энергетики.

Ключевые слова: математическое моделирование, очистка кремния, получение кремния солнечного качества, диффузия примесей.

Введение. В связи с интенсивным развитием солнечной энергетики и вследствие этого возросшей потребностью в кремнии солнечного качества актуальной задачей является поиск новых экономически эффективных и экологически безопасных методов промышленной очистки кремния до степени чистоты, достаточной для изготовления солнечных элементов. Одним из таких методов является метод экстракции из твердой фазы описанный нами ранее в [1,2]. Метод основан на диффузии примесей из частиц ультраметаллургического кремния (*перевод - Upgraded Metallurgical Silicon*) в вещество-экстрагент при высокой температуре. Метод имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами очистки: в процессе очистки не используются химически активные и экологически опасные вещества (в том числе соединения хлора), не образуются химические соединения и не происходит фазовых переходов очищаемого кремния.

В основе метода лежит диффузия примесей из металлургического кремния (предварительно

измельченного до частиц размером 10-60 мкм и очищенного методом гидрометаллургического рафинирования) в расплавленное вещество-экстрагент. Процесс происходит при высокой температуре (свыше 1200 °С, но менее температуры плавления кремния). Необходимым условием очистки является меньшее значение концентрации примесей в веществе-экстрагенте, чем в частицах кремния. При диффузии происходит перенос содержащихся в кремнии примесей к поверхности частиц и их дальнейшее растворение в веществе-экстрагенте. В ходе процесса концентрация примеси в веществе-экстрагенте увеличивается и градиент концентрации уменьшается, в результате чего снижаются скорость и глубина очистки. В работе [1] с использованием упрощенной модели представлены данные о влиянии на скорость очистки двух факторов: размера частиц и температуры. Для исследования влияния другого фактора – соотношения объемов кремния и вещества-экстрагента, определяющего как скорость, так и глубину очистки, необходима разработка более

сложной модели и выполнение с её помощью численных расчетов.

В данной работе представлены усовершенствованная математическая модель процесса очистки кремния методом экстракции из твердой фазы и полученные с её помощью расчетные данные.

Математическая модель экстракции примесей из частиц кремния. Математическая модель диффузии примесей основана на приближении сферической геометрии частиц кремния. Диффузия примесей из частиц описывается уравнением:

$$\frac{\partial}{\partial t} n(r, t) = D(T) \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} n(r, t) + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} n(r, t) \right] \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$\frac{\partial}{\partial r} n(0, t) = 0 \quad \text{- в центре частицы;}$$

$$n(R, t) = n_{extr}(t) \quad \text{- на её поверхности,}$$

$$\text{где } n_{extr}(t) = n_{0extr} + \frac{V_{Si}}{V_{Ext} + V_{Si}} \frac{3}{R^3} \int_0^R n(r, t) \cdot r^2 dr,$$

и начальными условиями

$$n(r, 0) = n_0;$$

$$n_{extr}(0) = n_{0extr},$$

где $n(r, t)$ – концентрация примеси в кремнии, $n_{extr}(t)$ – концентрация примеси в веществе-экстрагенте, r – радиальная координата, t – время, $D(T)$ – коэффициент диффузии, T – температура, R – радиус частицы, n_0 – начальная концентрация примеси в кремнии, n_{0extr} – начальная концентрация примеси в веществе-экстрагенте, V_{Si} – объем кремния, V_{extr} – объем вещества-экстрагента.

Особенностью данной модели является то, что она позволяет учитывать изменение концентрации примеси в веществе-экстрагенте с течением времени. Это позволяет существенно повысить точность и достоверность расчета процесса очистки кремния.

Уравнение (1) решалось методом конечных разностей с использованием однородной расчетной сетки. Используя свойство симметричности сферической геометрии, расчет производили только для одного направления – отрезка, соединяющего центр сферической частицы с точкой на её поверхности. Расчетная геометрия модели представлена на рисунке 1.

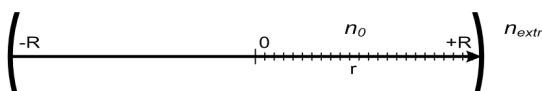


Рисунок 1- Расчетная геометрия модели

Для достижения оптимального соотношения между точностью и скоростью численного расчета число шагов пространственной сетки m было выбрано равным 100.

Численная модель представлена системой конечно-разностных уравнений. Приращение концентрации примеси на каждом временном i -м шаге описывается выражением:

$$\Delta n_{i,j} = \Delta t \cdot D \left[\frac{n_{i,j+1} - 2n_{i,j} + n_{i,j-1}}{\Delta r^2} + \frac{2}{r_j} \left(\frac{n_{i,j+1} - n_{i,j-1}}{2\Delta r} \right) \right],$$

где Δt – временной шаг, D – коэффициент диффузии, r – пространственная координата, Δr – пространственный шаг.

На границе сетки для соответствия краевому условию уравнения (1) введено условие $\Delta n_1 = \Delta n_2$.

Масса примеси mp_i , диффундирующей из одной частицы радиусом R за временной шаг, определяется соотношением:

$$mp_i = \sum_{j=1}^m \Delta n_{i,j} \Delta V_j,$$

где ΔV_j – объем j -го слоя:

$$\Delta V_j = \frac{4}{3} \pi [r_j^3 - r_{j-1}^3].$$

Концентрация примеси в веществе экстрагенте равна:

$$n_{i,extr} = n_{0extr} - \frac{V_{Si}}{V_P (V_{Ext} + V_{Si})} \sum_{k=1}^i mp_k,$$

где V_P – объем одной частицы, $V_P = \frac{4}{3} \pi R^3$.

Величина $n_{j,extr}$ является также и значением концентрации на границе расчетной области:

$$n_{i,m} = n_{i,extr}.$$

Средняя концентрация примеси внутри частицы вычисляется по формуле:

$$nav_i = \frac{1}{V_P} \sum_{j=1}^m n_{i,j} \Delta V_j.$$

При расчете временной шаг определяется из условия Куранта:

$$\Delta t = K \frac{\Delta r}{2D},$$

где K – критерий Куранта, выбирается из условия $K \leq 1$.

Численная модель была разработана и протестирована с помощью пакета математического моделирования MatLab.

В расчетах рассматривалась диффузия основных примесей, определяющих качество солнечного кремния – бора, фосфора, алюминия, углерода, железа, меди. Данные о коэффициентах диффузии примесей взяты из [3,4]. При

расчете использованы Эрмитовы кубические сплайн-интерполяции (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) зависимостей коэффициента диффузии примесей от температуры (рисунок 2).

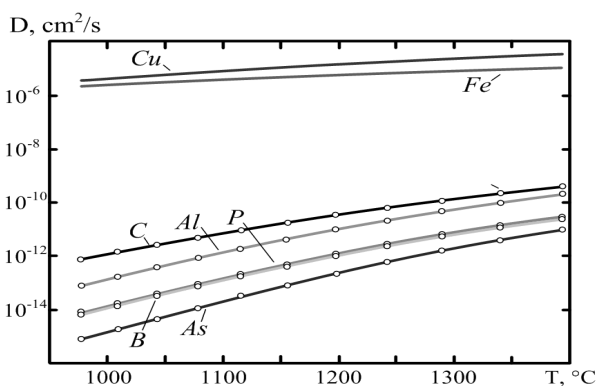


Рисунок 2 - Зависимости коэффициента диффузии примесей в кремнии от температуры

Условия численного эксперимента. Основными параметрами, определяющими скорость очистки, являются размер частиц (диаметр), температура и соотношение объемов кремния и вещества - экстрагента. С помощью разработанной модели было выполнено численное моделирование влияния этих факторов на скорость очистки кремния.

Основные исходные данные для модели (значения температуры, радиусы частиц, соотношения объемов) были выбраны исходя из физически и технологически достижимых и целесообразных реальных значений, при которых возможна эффективная очистка кремния от основных типов примесей, определяющих его качество. Для расчета были выбраны следующие условия численного эксперимента: диапазон рабочих температур – 1200-1395 °С, диаметр частиц - 20-60 мкм, начальная концентрация примесей - 10^{17} см⁻³, начальная концентрация примеси в веществе-экстрагенте - $5 \cdot 10^{13}$ см⁻³, соотношение объемов кремния и вещества-экстрагента варьировалось от 1 до 0,01. Верхняя граница выбранного температурного диапазона фактически соответствует температуре плавления кремния, нижняя граница выбрана исходя из условия достижения технологически приемлемого времени очистки, диапазон диаметров частиц соответствует размерам частиц, получаемых при измельчении кремния мельницами шарового типа, начальная концентрация примеси соответствует концентрации примеси на уровне десятков ppm (предварительно рафинированный металлургический кремний), концентрация примеси в веществе-экстрагенте выбиралась из условия достижения степени очистки

менее 1 ppm. Выбранный диапазон соотношений объемов кремния и вещества-экстрагента соответствует реальным технологическим значениям объемов, при которых возможна промышленная реализация процесса.

Результаты численного эксперимента. Моделирование показывает, что в начальный момент времени в результате диффузии концентрация примеси вблизи поверхности частицы начинает быстро уменьшаться, что обусловлено высоким градиентом концентрации (рисунок 3). При этом на начальной стадии процесса скорость снижения средней концентрации примеси в частицах кремния достаточно высока, но по мере уменьшения градиента концентрации скорость очистки снижается.

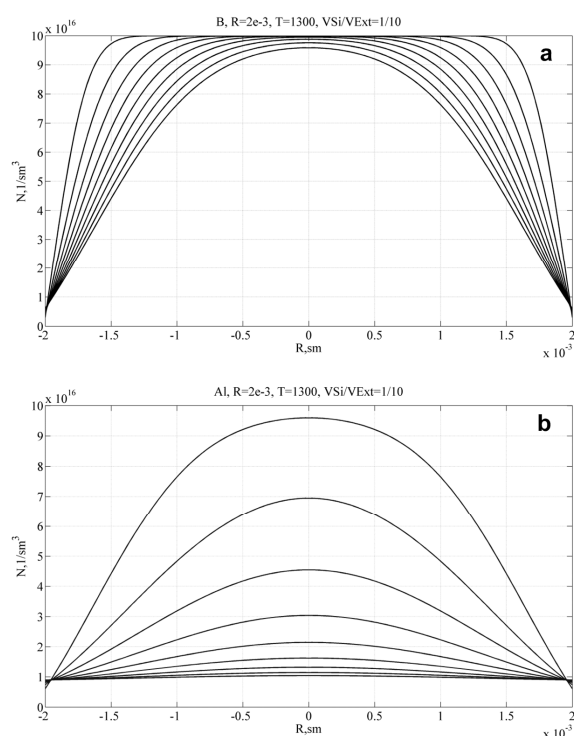


Рисунок 3 - Профили концентрации примесей (Р - а, Al - б) вдоль осевой линии сечения частицы в различные моменты времени. Радиус частиц $R=2 \cdot 10^{-3}$ см, температура $T=1300$ °С, соотношение объемов $V_{Si}/V_{ext}=1/10$. Шаг между профилями 1 час

Одновременно с этим, по мере растворения примеси в экстрагенте концентрация примеси в нем начинает возрастать. Основными параметрами, определяющими скорость очистки, являются размер частиц и температура процесса, а параметром, лимитирующим глубину очистки, является соотношение объемов кремния и вещества экстрагента.

С точки зрения эффективности очистки практически важным параметром является средняя концентрация примесей. На рисунке 4 показаны зависимости средней концентрации от

различных условий очистки. Из зависимостей видно, что в начале процесса при большом приповерхностном градиенте скорость очистки велика и средняя концентрация примеси быстро уменьшается. Далее по мере спада градиента скорость уменьшения средней концентрации снижается. В некоторый момент времени, когда концентрации примеси в веществе-экстрагенте и частицах кремния сравниваются, достигается равновесное состояние, при котором средняя концентрация не изменяется.

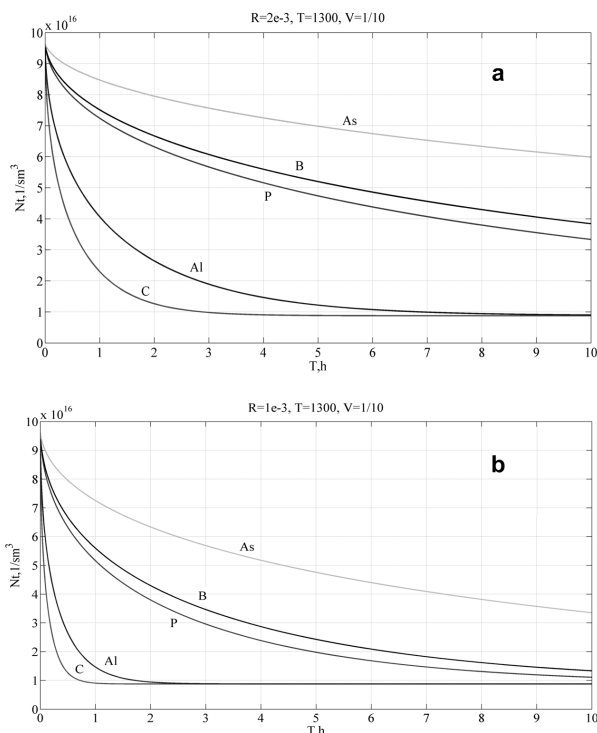


Рисунок 4 - Изменение средней концентрации примесей в частицах кремния во времени при различных размерах частиц: а – $R=20$ мкм, $T=1300$ °С, соотношение объемов $V_{Si}/V_{ext}=1/10$; б – $R=10$ мкм, $T=1300$ °С, соотношение объемов $V_{Si}/V_{ext}=1/10$

Скорость очистки зависит от коэффициента диффузии, величина которого определяется типом примеси. Из рассмотренных типов примесей наиболее легко удаляются медь и железо: расчеты показывают, что в указанном диапазоне температур и диаметров частиц их концентрация в частицах кремния приближается к равновесной за время порядка 10-100 с (и поэтому они не отражены на рисунках). Из представленных зависимостей видно, что легко диффундирующие примеси, такие как алюминий и углерод, быстро выводятся из объема частицы, а примеси с малым коэффициентом диффузии (бор, фосфор и особенно мышьяк) – медленно. Очистка кремния от мышьяка данным методом неэффективна даже при температуре, близкой к температуре плавления кремния.

На рисунке 4 представлены временные диаграммы уменьшения средней концентрации различных типов примесей при различных размерах частиц и постоянных температуре и соотношении объемов. Видно, что с уменьшением радиуса скорость очистки возрастает – при времени технологического процесса 10 часов и температуре 1300 °С уменьшение радиуса с 40 до 20 мкм приводит к снижению содержания бора более чем в два раза. Влияние температуры было показано в [1], где установлено, что скорость очистки возрастает с увеличением температуры.

Уменьшение соотношения объемов, как видно из рисунка 5, незначительно влияет на скорость очистки, но существенно повышает её глубину: при температуре 1300 °С и радиусе частицы 20 мкм изменение соотношения объемов от 1/10 до 1/100 приводит к пропорциональному уменьшению равновесной концентрации углерода и алюминия (на порядок). Лимитирующее влияние соотношения объемов V_{Si}/V_{ext} на максимально достижимую степень очистки объясняется полным распределением примеси между суммарным объемом частиц кремния и объемом вещества - экстрагента.

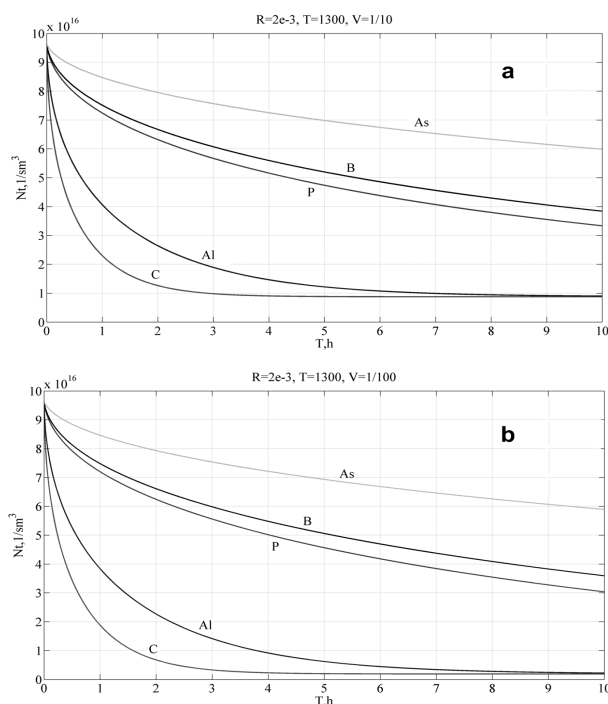


Рисунок 5 - Изменение средней концентрации примесей в частицах кремния во времени при различном соотношении объемов кремния и вещества-экстрагента: а – соотношение объемов $V_{Si}/V_{ext}=1/10$, $R=20$ мкм, $T=1300$ °С; б – соотношение объемов $V_{Si}/V_{ext}=1/100$, $R=20$ мкм, $T=1300$ °С

Для определения требований к размеру частиц, температуре процесса и соотношению

объемов, при которых достигается технологическая и экономическая рентабельность процесса, был выбран количественный критерий эффективности очистки t_{rd} – время, за которое концентрация примесей уменьшается в пять раз. Основными примесями, определяющими качество солнечного кремния, являются бор и фосфор. Коэффициенты диффузии этих примесей в кремнии близки по величине, а коэффициенты диффузии других примесей – меди, железа, углерода и алюминия существенно больше, то есть если концентрация бора и фосфора уменьшается в пять раз, то концентрация остальных примесей (кроме мышьяка) уменьшается более чем в пять раз. Это позволяет использовать в качестве критерия эффективности очистки t_{rd} для бора или фосфора.

Используем t_{rd} для фосфора, поскольку он в большей степени определяет качество пластин р-типа (из которых изготавливаются солнечные элементы), чем бор, которым они легируются [5,6]. На рисунке 6 представлены зависимости t_{rd} для фосфора от диаметра и температуры частиц, полученные на основе данных моделирования. Показан наиболее интересный временной диапазон (0-50 часов).

Для определения требований к технологическому режиму очистки установим с точки зрения промышленного производства верхнюю границу приемлемого времени очистки кремния от фосфора t_{rd} равной 10 часам. Наложение этого критерия на зависимости, представленные на рисунке 6, а, б, дает области под прямой, соответствующие промышленно - эффективным режимам очистки кремния методом экстракции.

Из рисунка 6,а, видно, что условие $t_{rd} \leq 10$ часов достигается при $T \geq 1395$ °С, если диаметр частиц менее 48 мкм; при температуре 1350-1395 °С, условие $t_{rd} \leq 10$ часов выполняется, если диаметр частиц менее 32 мкм; при температуре равной 1300-1350 °С, условие $t_{rd} \leq 10$ часов при диаметре частиц менее 24 мкм; и наконец при температуре 1250-1300 °С условие $t_{rd} \leq 10$ часов не выполняется.

Из рисунка 6,б видно, что условие $t_{rd} \leq 10$ часов достигается в диапазоне температур > 1275 °С, если диаметр частиц не превышает 20 мкм; при диаметре частиц от 40 мкм условие $t_{rd} \leq 10$ часов выполняется в температурном диапазоне > 1377 °С; и наконец, если диаметр частиц составляет более 60 мкм, то условие $t_{rd} \leq 10$ часов не выполняется.

Из рисунка 6,с следует, что условие $t_{rd} \leq 10$ часов достигается, если соотношение объемов кремния и экстрагента составляет 1/100. При соотношении объемов 1/10 и при выбранных

условиях ($T = 1300$ °С, $R = 20$ мкм) время, за которое концентрация уменьшается в 5 раз, составляет от 20 до 15 часов, что несколько выше установленного условия $t_{rd} \leq 10$ часов. В целом соотношение объемов незначительно влияет на скорость очистки, но оно является лимитирующим фактором степени очистки кремния.

Перечисленные выше требования к температуре, диаметру частиц и соотношению объемов не полностью охватывают весь возможный диапазон условий, при которых достигается условие $t_{rd} \leq 10$ часов, что связано с дискретностью численного эксперимента, однако они определяют нижнюю границу требований к условиям технологического процесса, при которых достигаются приемлемое время и эффективность очистки.

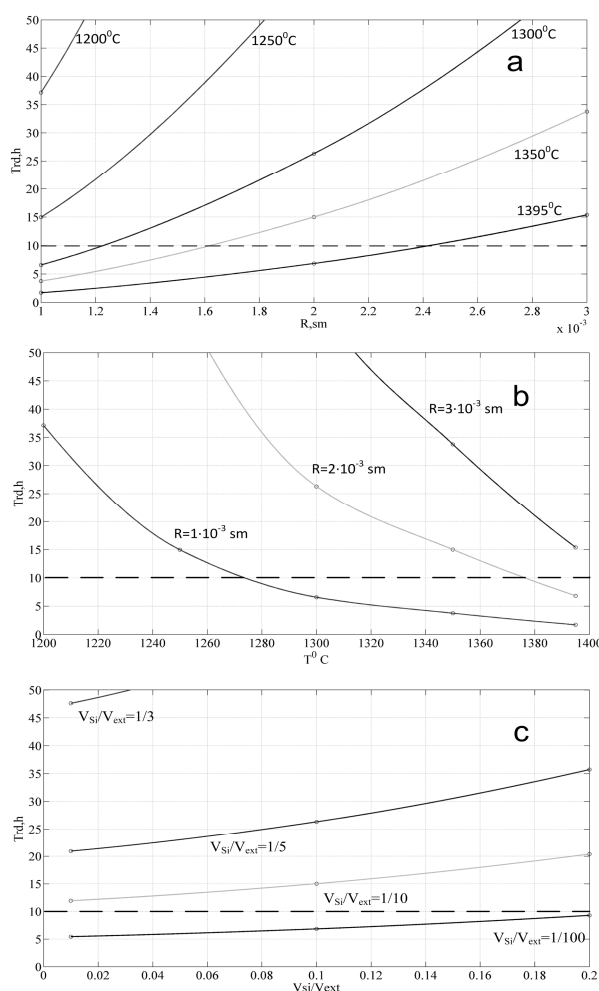


Рисунок 6 - Зависимости времени уменьшения концентрации примеси (фосфор) в пять раз от диаметра частицы кремния (а), от температуры (б) и соотношения объемов (с). Показан наиболее интересный временной диапазон 0-50 часов

Полученные расчетные результаты подтверждены экспериментально.

Заключение.

1. Построена усовершенствованная матема-

тическая модель процесса очистки экстракцией из твердой фазы, находящейся в мелко-дисперсном состоянии. Модель основана на приближении сферической геометрии частиц кремния, учитывает диффузию основных типов примесей, определяющих качество солнечного кремния, - В, Р, Al, Cu, Fe, As, С и изменение их содержания в веществе-экстрагенте с течением времени.

2. С помощью модели получены распределения концентрации примесей вдоль осевого сечения частицы в различные моменты времени, динамика изменения средней концентрации примесей во времени при различных условиях очистки.

3. На основе данных моделирования установлены требования к технологическому режиму очистки. В качестве критерия эффективной очистки выбрано время t_{rd} уменьшения средней концентрации фосфора в пять раз, равное 10 часам. Обработка данных численного эксперимента показала диапазоны значений температур, радиусов частиц и соотношений объемов, при которых достигается эффективная очистка кремния от примесей.

4. Установлено, что основным фактором, лимитирующим глубину очистки, является соотношение объемов кремния и экстрагента. С целью повышения степени очистки целесообразно уда-

ление примесей из вещества - экстрагента с помощью газовой или жидкостной экстракции. Таким образом, с использованием численного моделирования определены технологические требования к основным характеристикам технологии очистки кремния до солнечного качества методом экстракции из твердой фазы.

Библиографический список

1. *Sergey M. Karabanov, Dmitriy V. Suvorov, Boris N. Sazhin, Sergey B. Ilichev.* Mathematical modeling of silicon purification by solid phase extraction method// Proceedings of 24nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany

2. *Sergey M. Karabanov, Dmitriy V. Suvorov, Boris N. Sazhin.* Purification of Refined Metallurgical-grade Silicon up to Solar-grade Silicon by Extraction// Proceedings of MRS Spring Meeting, 13 - 17 April 2009, San Francisco, CA, USA.

3. *Adolf Goetzberger, Joachim Knobloch, Bernhard Vob.* Crystalline Silicon Solar Cells. John Wiley & Sons Ltd, England, 1998, P. 232.

4. *D.L. Beke.* Diffusion in Semiconductors and Non-Metallic Solids. Springer, Germany, 1998, p. 257.

5. *Antonio Luque, Steven Hegedus .* Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons Ltd, England, 2003, P. 1164.

6. *Tom Markvart, Luis Castafier.* Solar Cells Materials, Manufacture and Operation. Elsevier Ltd, The Netherlands, 2005, P. 556.

УДК 621.313: 621.387

Н.М. Верещагин, С.А. Круглов, А.А. Серезжин, А.И. Майсурадзе **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА** **ПРЕРЫВАНИЯ ТОКА ГАЗОРАЗРЯДНЫМ КОММУТАТОРОМ** **В ГЕНЕРАТОРЕ МОЩНЫХ НАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ** **С ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ**

Для трех диапазонов напряжения на аноде проведена оценка энергии, выделившейся в газоразрядном коммутаторе и на нагрузке на стадии прерывания тока, а также энергии, выделившейся в нагрузке после выключения коммутатора. Установлено, что наибольшие энергетические потери возникают в третьем диапазоне. Получены аппроксимирующие функции тока анода и напряжения на аноде на стадии коммутации для трех диапазонов напряжения.

Ключевые слова: индуктивный накопитель энергии, газоразрядный прерыватель тока, потери энергии в коммутаторе.

Введение. Генераторы высоковольтных импульсов широко применяются в медицине, экологии, физике высоких энергий, связи, радиолокации. В последнее время большое внимание уделяется индуктивным накопителям энергии

(ИНЭ), которые используют источники питания с напряжением в десятки раз ниже требуемой амплитуды импульса напряжения на нагрузке и имеют объем и массу на три порядка меньше, чем емкостные накопители. Однако построение

генераторов высоковольтных импульсов на основе ИНЭ требует надежных размыкателей тока [1]. Проведенные ранее исследования показали, что наиболее эффективными размыкателями являются газоразрядные прерыватели тока. Использование газоразрядных прерывателей в схемах с ИНЭ основано на обрыве дуги в газонаполненных промежутках низкого давления с переменным сечением по длине разряда. Критерием обрыва разряда является заряд, переносимый через сужение [2, 3]. В момент обрыва ток через коммутатор убывает и на аноде прибора возникает высоковольтный импульс напряжения. Зная характер изменения токов и напряжения в схеме, можно путем изменения рабочих параметров определить оптимальные режимы работы ИНЭ и оценить потери энергии на выключение.

Энергетические характеристики работы коммутатора являются одними из самых важных, они определяют КПД и срок службы прибора. В рассматриваемом случае потери на включение можно не учитывать, так как запуск тиратрона осуществляется с нулевым током, который затем плавно нарастает. Основными энергетическими потерями в коммутаторе являются потери на выключение и потери на проводимость. Наибольший интерес представляют потери, возникающие при запирации тиратрона.

Цель работы - определение потерь энергии на стадии выключения газоразрядного прерывателя тока.

Основная часть. Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 1. Ток через тиратрон *VI* измерялся с помощью пояса Роговского, напряжение на аноде – с помощью делителя *R1, R2* осциллографом RIGOL DS1042C.

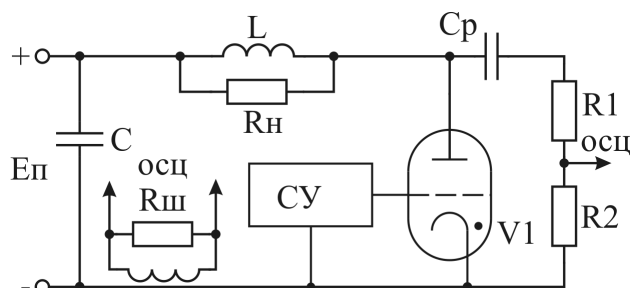


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Принцип работы схемы заключается в следующем. При подаче напряжения питания $E_{п}$ заряжается конденсатор C , на аноде коммутатора VI устанавливается напряжение, регулируемое от 0 до 3 кВ. После подачи импульса управления на сетку VI он открывается и по цепи $+E_{п} - L - VI - -E_{п}$ протекает ток. Индуктивность L запасает энергию. Через неко-

торый интервал времени ток обрывается, и на аноде прибора возникает высоковольтный импульс напряжения. Энергия, накопленная в индуктивности, передается в нагрузку, формируя импульс высокого напряжения. Ток, протекающий через коммутатор, переключается в нагрузку. Далее процесс повторяется.

Энергия, накопленная в индуктивности, определяется по формуле:

$$W = \frac{L \cdot I^2}{2}, \quad (1)$$

где L – величина накопительной индуктивности, I – амплитуда тока в момент обрыва.

Для определения энергии, выделяющейся в приборе на стадии выключения, необходимо знать закон изменения тока через прерыватель и напряжения на его аноде во времени. По результатам проведенных экспериментов установлено, что независимо от амплитуды анодного тока имеется три диапазона напряжения (0 – 23 кВ; 24 – 45 кВ; 46 – 80 кВ), каждый из которых характеризуется собственными законами изменения тока и напряжения во времени.

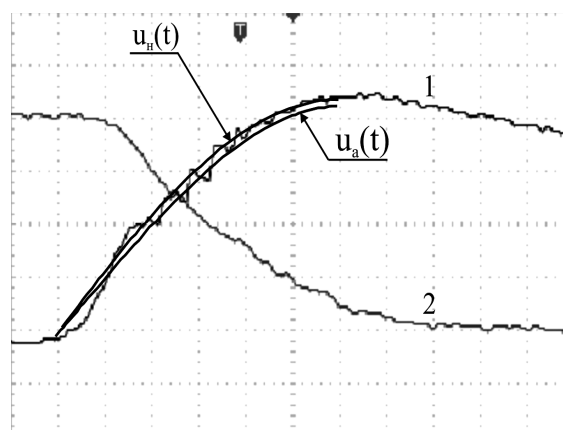


Рисунок 2 – Осциллограмма напряжения на аноде - 1, осциллограмма тока анода - 2, $u_a(t)$ – аппроксимирующая функция напряжения, $u_n(t)$ – функция напряжения на аноде, рассчитанная через ток индуктивности ($U=3$ кВ/дел, $I=100$ А/дел, $t=50$ нс/дел)

В первом диапазоне закон изменения напряжения с погрешностью не более 5 % аппроксимируется функцией (рисунок 2):

$$u_a(t) = U_m \sin\left(\frac{t\pi}{2t_k}\right), \quad (2)$$

а закон изменения тока (рисунок 3):

$$i_k(t) = I_m \left(1 - \sin\left(\frac{t\pi}{2t_k}\right)\right), \quad (3)$$

где $u_a(t)$ – напряжение на аноде коммутатора,

$i_k(t)$ – ток через коммутатор, I_m – ток через индуктивность в момент обрыва, U_m – максимальное напряжение на нагрузке, t_k – время обрыва тока коммутатором.

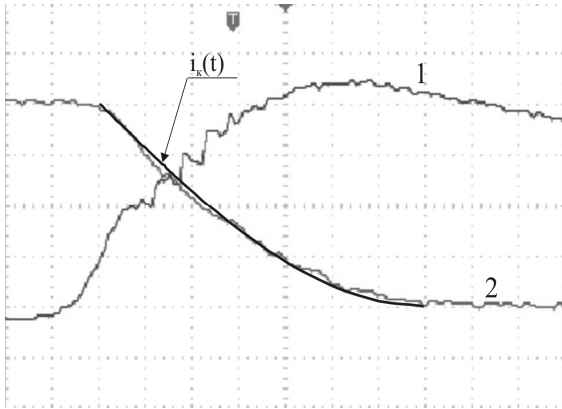


Рисунок 3 – Осциллограмма напряжения на аноде – 1, осциллограмма тока анода – 2, $i_k(t)$ – аппроксимирующая функция тока анода ($U=3$ кВ/дел, $I=100$ А/дел, $t=50$ нс/дел)

С целью проверки правильности аппроксимации был проведен расчет временной зависимости напряжения на аноде с использованием аппроксимации тока через коммутатор на стадии выключения $i_k(t)$. Для этого на стадии выключения рассчитывались токи в эквивалентной схеме, представленной на рисунке 4.

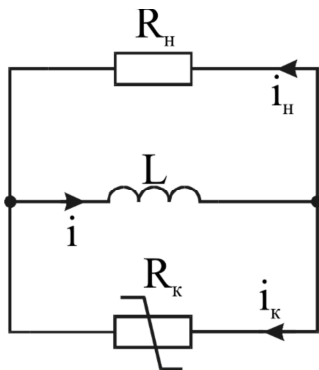


Рисунок 4 – Схема высоковольтной части генератора на стадии обрыва тока

Уравнения Кирхгофа для эквивалентной схемы имеют вид:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + i_n(t)R_n = 0 \\ i_n(t) = i(t) - i_k(t). \end{cases} \quad (4)$$

Используя аппроксимацию тока через коммутатор на стадии выключения $i_k(t)$ для первого диапазона (3) и решая дифференциальное уравнение

$$L \frac{di}{dt} + (i(t) - i_k(t))R_n = 0, \quad (5)$$

находим ток индуктивности на стадии коммутации $i(t)$. Учитывая, что $i_n(t) = i(t) - i_k(t)$, находим:

$$u_n(t) = i_n(t)R_n. \quad (6)$$

В первом диапазоне рассчитанная функция напряжения на аноде на стадии выключения имеет вид:

$$u_n(t) = R_n \left[e^{-\frac{t}{\tau}} \left(\frac{I_m}{\tau} e^{\frac{t}{\tau}} \frac{1}{\tau} \frac{\sin\left(\frac{t\pi}{2t_k}\right) - \frac{\pi}{2t_k} \cos\left(\frac{t\pi}{2t_k}\right)}{\frac{1}{\tau^2} + \left(\frac{\pi}{2t_k}\right)^2} + I_m \cdot \left(1 + \frac{\frac{\pi}{2t_k \cdot \tau}}{\frac{1}{\tau^2} + \left(\frac{\pi}{2t_k}\right)^2} \right) - I_m \left(1 - \sin\left(\frac{t\pi}{2t_k}\right) \right) \right), \quad (7)$$

где $\tau=L/R_n$ – постоянная времени разряда индуктивности на нагрузку. Как видно из рисунков 2 и 3, аппроксимирующие функции тока и напряжения хорошо совпадают с экспериментальными зависимостями. Таким образом, использование приведенных аппроксимаций для дальнейших расчетов является правомочным.

Энергия, затраченная на выключение, определяется током через коммутатор и напряжением на нем на стадии коммутации:

$$W_{\Pi} = \int_0^{t_k} u_a(t) \cdot i_k(t) dt, \quad (8)$$

где W_{Π} – энергия, рассеиваемая в прерывателе. Подставляя (2) и (3) в (8), получаем:

$$W_{\Pi} = \int_0^{t_k} U_m \cdot I_m \cdot \sin\left(\frac{t \cdot \pi}{2 \cdot t_k}\right) \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{t \cdot \pi}{2 \cdot t_k}\right)\right) dt, \quad (9)$$

$$W_{\Pi} = 0,136 U_m I_m t_k. \quad (10)$$

Во втором диапазоне закон изменения напряжения аппроксимируется функцией (рисунок 5):

$$u_a(t) = U_m \frac{t}{t_k}, \quad (11)$$

а закон изменения тока (рисунок 6):

$$i_k(t) = I_m \left(1 - \frac{t}{t_k}\right). \quad (12)$$

Подставляя (12) в (5) и решая полученное уравнение, находим функцию напряжения на аноде на стадии выключения для второго диапазона:

$$u_n(t) = I_m R_n \frac{\tau}{t_k} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right). \quad (13)$$

Подставив (11) и (12) в (8) и проведя аналогичные расчеты, получим:

$$W_{\text{н}} = \int_0^{t_{\text{к}}} I_{\text{м}} U_{\text{м}} \left(\frac{t}{t_{\text{к}}} - \frac{t^2}{t_{\text{к}}^2} \right) dt = I_{\text{м}} U_{\text{м}} \left(\frac{t^2}{2t_{\text{к}}} - \frac{t^3}{3t_{\text{к}}^2} \right) \Big|_0^{t_{\text{к}}}, \quad (14)$$

$$W_{\text{н}} = 0,167 U_{\text{м}} I_{\text{м}} t_{\text{к}}. \quad (15)$$

Как видно из рисунков 5 и 6, аппроксимирующие функции тока и напряжения хорошо совпадают с экспериментальными зависимостями в данном диапазоне.

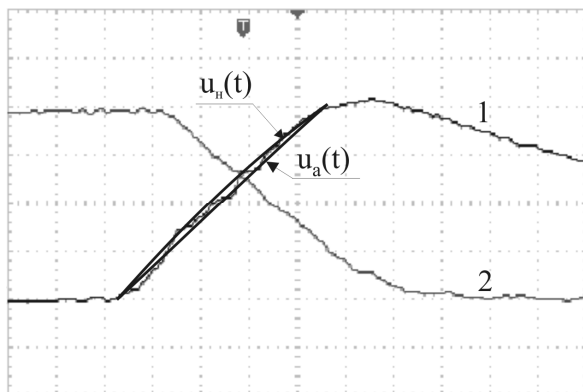


Рисунок 5 – Осциллограмма напряжения на аноде - 1, осциллограмма тока анода - 2, $u_{\text{а}}(t)$ – аппроксимирующая функция напряжения, $u_{\text{н}}(t)$ – функция напряжения на аноде, рассчитанная через ток индуктивности ($U=6$ кВ/дел, $I=100$ А/дел, $t=50$ нс/дел)

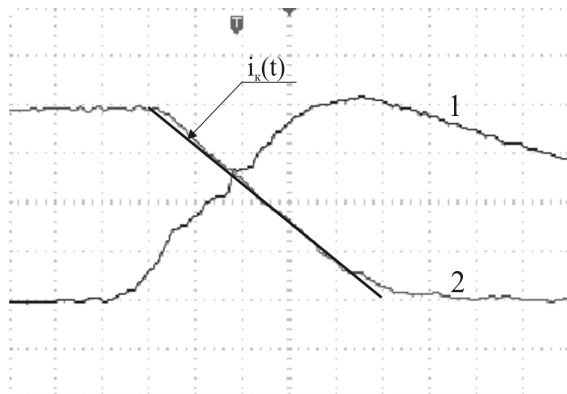


Рисунок 6 – Осциллограмма напряжения на аноде - 1, осциллограмма ток анода - 2, $i_{\text{к}}(t)$ – аппроксимирующая функция тока анода ($U=6$ кВ/дел, $I=100$ А/дел, $t=50$ нс/дел)

В третьем диапазоне закон изменения напряжения аппроксимируется функцией (рисунок 7):

$$u_{\text{а}}(t) = U_{\text{м}} \frac{t}{t_{\text{к}}} \frac{e^{\frac{t}{t_{\text{к}}}}}{e}, \quad (16)$$

а закон изменения тока (рисунок 8):

$$i_{\text{к}}(t) = I_{\text{м}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{к}}} \frac{e^{\frac{t}{t_{\text{к}}}}}{e} \right). \quad (17)$$

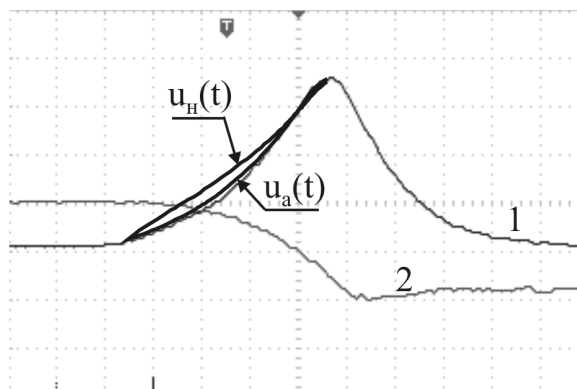


Рисунок 7 – Осциллограмма напряжения на аноде - 1, осциллограмма тока анода - 2, $u_{\text{а}}(t)$ – аппроксимирующая функция напряжения, $u_{\text{н}}(t)$ – функция напряжения на аноде, рассчитанная через ток индуктивности. ($U=15$ кВ/дел, $I=100$ А/дел, $t=50$ нс/дел)

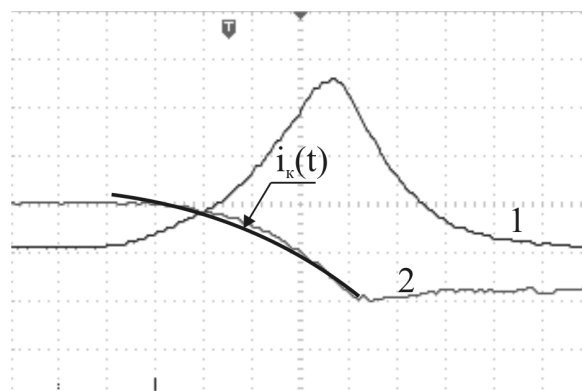


Рисунок 8 – Осциллограмма напряжения на аноде - 1, осциллограмма тока анода - 2, $i_{\text{к}}(t)$ – аппроксимирующая функция тока анода ($U=15$ кВ/дел, $I=100$ А/дел, $t=50$ нс/дел)

Подставляя (17) в (5) и решая полученное уравнение, находим соотношение, определяющее временную зависимость анодного напряжения на стадии выключения для третьего диапазона:

$$u_{\text{н}}(t) = R_{\text{н}} \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \left(\frac{I_{\text{м}}}{\tau} \cdot \left(\tau e^{\frac{t}{\tau}} + e^{\frac{t}{\tau} - \frac{t}{t_{\text{к}}}} \left(\frac{\tau^2 \cdot t_{\text{к}}}{\tau^2 + 2\tau \cdot t_{\text{к}} + t_{\text{к}}^2} - \frac{\tau t}{\tau + t_{\text{к}}} \right) \right) + I_{\text{м}} \left(1 - \frac{1}{\tau} \cdot \left(\tau + \frac{\tau^2 t_{\text{к}}}{e \cdot (\tau^2 + 2\tau t_{\text{к}} + t_{\text{к}}^2)} \right) \right) \right) - I_{\text{м}} \left(1 - \frac{t}{t_{\text{к}}} \frac{e^{\frac{t}{t_{\text{к}}}}}{e} \right) \right). \quad (18)$$

Как видно из рисунков 7 и 8, в данном диапазоне аппроксимирующие функции тока и напряжения хорошо совпадают с экспериментальными данными.

Подставив (16) и (17) в (8) и проведя аналогичные расчеты, получим:

$$W_{\text{п}} = 0,152 U_{\text{м}} I_{\text{м}} t_{\text{к}}. \quad (19)$$

Энергия, выделяющаяся в нагрузке, определяется суммой энергий, переданных в нагрузку на стадии выключения коммутатора, и последующим за этим процессом передачи энергии от накопителя в нагрузку.

Энергия, выделяющаяся в нагрузке во время коммутации, определяется формой напряжения на аноде в процессе выключения:

$$W_{\text{н.к}} = \int_0^{t_{\text{к}}} \frac{u_{\text{а}}^2(t)}{R_{\text{н}}} dt. \quad (20)$$

Энергия, выделяющаяся в нагрузке во время разрядки накопителя, рассчитывается по соотношению:

$$W_{\text{н.н}} = \int_0^{3\tau} \frac{\left(U_{\text{м}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)^2}{R_{\text{н}}} dt, \quad (21)$$

$$W_{\text{н.н}} = \frac{U_{\text{м}}^2}{2 \cdot R_{\text{н}}} \cdot \tau. \quad (22)$$

Приведенные выражения целесообразно использовать в дальнейших исследованиях.

Таблица

	Рисунок 2	Рисунок 5	Рисунок 7
$R_{\text{н}}, \text{ Ом}$	36	72	620
$U_{\text{м}}, \text{ В}$	12500	24000	52200
$I_{\text{м}}, \text{ А}$	400	400	200
$L, \text{ мкГн}$	36	36	36
$t_{\text{ком}}, \text{ нс}$	250	160	175
$W_{\text{L}}, \text{ Дж}$	2,88	2,88	0,72
$W_{\text{п}}, \text{ Дж}$	0,17	0,273	0,278
$W_{\text{н.к}}, \text{ Дж}$	0,543	0,453	0,256
$W_{\text{н.н}}, \text{ Дж}$	2,165	2	0,132
$\Sigma W, \text{ Дж}$	2,87	2,726	0,662

$$\Sigma W = W_{\text{п}} + W_{\text{н.к}} + W_{\text{н.н}}$$

Для оценки правильности предложенных аппроксимирующих функций проведен расчет накопленной энергии и энергий, выделившихся в коммутаторе и нагрузке. Результаты расчета представлены в таблице, из которой следует, что для всех трех диапазонов сумма энергий, выделившихся на стадии выключения, совпадает с энергией, накопленной в индуктивности.

Заключеие. В результате выполнения работы было установлено, что независимо от амплитуды анодного тока имеется три диапазона напряжения (0 – 23 кВ; 24 – 45 кВ; 46 – 80 кВ), каждый из которых характеризуется собственными законами изменения тока и напряжения во времени. Для трех диапазонов напряжения на нагрузке проведена оценка энергии, выделяющейся в газоразрядном коммутаторе и в нагрузке на стадии прерывания тока, а также энергии, выделяющейся в нагрузке после выключения коммутатора. Установлено, что наибольшие энергетические потери возникают в третьем диапазоне.

Для каждого из трех диапазонов напряжения получены аппроксимирующие функции изменения во времени тока анода и напряжения на аноде. С целью проверки точности предложенных аппроксимаций проведен расчет тока через индуктивность и нагрузку с использованием аппроксимированной функции тока через прибор. Расчет показывает хорошее (не более 5 %) совпадение величин накопленной и израсходованной энергии.

Работа выполнена в рамках реализации НИР «Исследование обрывных явлений в диафрагмированной плазме газоразрядного коммутатора тока, включенного в схеме индуктивного накопителя энергии» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Библиографический список

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука. – 2004. – 704 с.
2. Верещагин Н.М., Круглов С.А. ПТЭ. – 2002. – № 2. – С.82.
3. Верещагин Н.М., Бочков В.Д., Круглов С.А. ПТЭ. – 2002. – № 6. – С. 56.