

НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

**Труды XXIV Международного
симпозиума**

10–13 марта 2020 г., Нижний Новгород

Том 2

Секции 3, 5

Нижний Новгород
Издательство Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского
2020

SPICE-модель электронной системы матричного источника рентгеновского излучения

И.Д. Евсиков^{1,*}, Г.Д. Демин^{1,§}, Н.А. Дюжев¹, М.А. Махиборода¹

¹ Национальный исследовательский университет «МИЭТ», пл. Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498.

*evsikov.ilija@yandex.ru, §gddemin@gmail.com

В данной работе описывается SPICE-модель электронной системы матричного источника рентгеновского излучения на основе матрицы кремниевых автоэмиссионных катодов. Представлена эквивалентная схема одиночного катодно-сеточного узла электронной системы рентгеновского источника. Приведены результаты моделирования работы катодно-сеточных узлов в SPICE-симуляторе электронных схем. Полученные результаты могут быть использованы при разработке рентгеновских литографических систем нового поколения.

Проекционная литография является основной технологией в области производства устройств микро- и наноэлектроники. Современные сканирующие устройства фотолитографии могут обеспечить производительность до 200 полупроводниковых пластин с диаметром 300 мм в час.

Использование иммерсионных методов (помещение жидкости с показателем преломления больше 1 в воздушный зазор между пленкой фоторезиста и линзой литографа) позволяет достичь пространственного разрешения вплоть до 8 нм. Эти технологические усложнения вынуждают использовать большое число фотошаблонов, что приводит к удорожанию производства.

Число масок и технологических операций сокращается при переходе к так называемой фотолитографии в глубоком ультрафиолете (EUV литографии) с длиной волны 13,5 нм. Впрочем, фотолитография в глубоком ультрафиолете до сих пор не получила достаточного распространения из-за вдвое меньшей по сравнению с иммерсионной литографией производительности, а также проблем, связанных с эффективной защитой масок от загрязнений [1].

Даже при успешном решении сопутствующих EUV литографии проблем, она будет рентабельна только при массовом производстве. Для мелкосерийного производства или создания тестовых образцов в рамках исследовательских проектов EUV литография практически не используется.

Альтернативой проекционной литографии с применением фотошаблонов являются методы безмасочной литографии – сканирующая оптическая и электронная. Но и эти методы не лишены своих недостатков: оптическая литография не может обеспечить разрешение лучше 100 нм, электронная литография в свою очередь не обладает производительностью достаточной для мелкосерийного производства [2].

Безмасочная рентгеновская литография – метод, который может обеспечить пространственное разрешение сравнимое с таковым при использовании методов EUV литографии и одновременно с этим производительность достаточную для промышленного применения. Одним из вариантов реализации литографической системы является подход, при котором роль электронной маски играет массив микрофокусных рентгеновских трубок с «прострельной» мишенью. Источником электронов в таком массиве является матрица кремниевых автоэмиссионных катодов острейного типа, совмещенных с ускоряющим сеточным электродом [3-4].

Помимо матрицы автоэмиссионных катодов в состав электронной системы безмасочного рентгеновского литографа входит схема управления элементами катодной матрицы. Для моделирования и проверки корректности функционирования всей электронной системы в целом или отдельных её элементов возможно применение схемотехнической модели системы, созданной с использованием SPICE-симулятора электронных схем.

SPICE-модель электронной системы источника рентгеновского излучения

SPICE-модель катодно-сеточного узла, который является единичным элементом электронной системы матричного источника рентгеновского излучения представлена на рисунке 1.

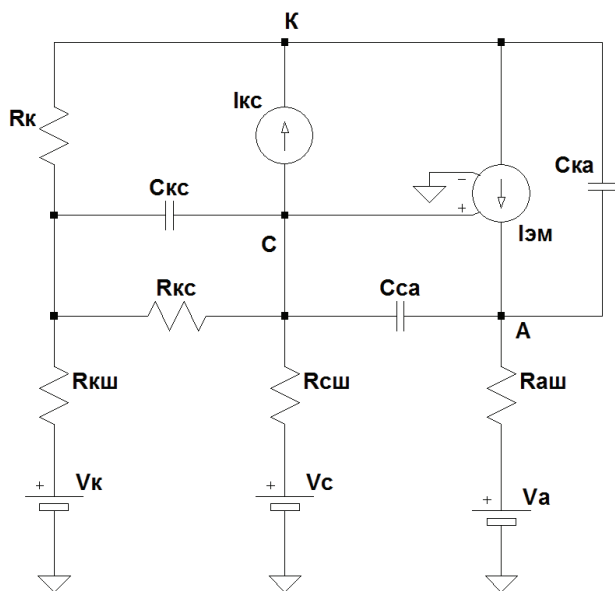


Рис. 1. Эквивалентная схема катодно-сеточного узла, являющегося единичным элементом матрицы автоэмиссионных катодов

На данной схеме большими буквами обозначены элементы катодно-сеточного узла: А – анод, С – сеточный электрод, К – автоэмиссионный катод. Разработанная схема катодно-сеточного узла учитывает влияние паразитных емкостей и проводимостей, значения которых были получены с использованием компьютерного программного обеспечения для проведения численного моделирования. Обозначения $R_{kш}$, $R_{сш}$, $R_{аш}$ на рисунке 1 относятся к сопротивлениям катодной, сеточной, и анодной шин соответственно. R_k – внутреннее сопротивление автоэмиссионного катода. По аналогии, $C_{кс}$, $C_{са}$, $C_{ка}$ – паразитные емкости между соответствующими элементами катодно-сеточного узла. Источник тока $I_{кс}$ был реализован в схеме для моделирования тока утечки с катода на сеточный электрод при малых величинах управляющих напряжений. Источник $I_{ам}$ моделирует протекание эмиссионного тока с катода на анод, совмещенный с рентгенопрозрачной мишенью.

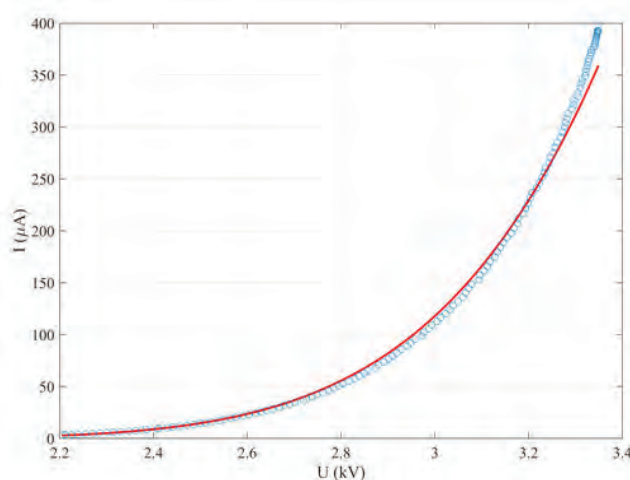


Рис. 2. Результаты моделирования работы (красная кривая) и экспериментальная характеристика (синие кружки) 60 катодно-сеточных узлов электронной системы матричного источника рентгеновского излучения

На рисунке 2 представлена вольт-амперная характеристика шестидесяти катодно-сеточных узлов, полученная из моделирования их работы в SPICE-симуляторе электронных схем, а также экспериментальная вольт-амперная характеристика 60 автоэмиссионных катодно-сеточных узлов. Данная характеристика была рассчитана при вариации управляющего анодного напряжения от 0 до 3,4 кВ. Фрагмент характеристики при напряжении меньшем 2,2 кВ не был включен в график по причине малых величин автоэмиссионного тока.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № 14.578.21.0250, RFMEFI57817X0250) с использованием оборудования ЦКП "Микросистемная техника и электронная компонентная база", поддержанного Минобрнауки России.

Литература

1. M. Neisser and S. Wurm // Adv. Opt. Tech. Vol. 4, No. 4. P. 235 (2015).
2. S. Okazaki // Microelectron. Eng. Vol. 133. P. 23–35 (2015).
3. N. I. Chkhalo *et al.* // Proc. of SPIE. Vol. 11022. P. 110221M (2019).
4. Дюжев Н.А. и др. // Журнал технической физики. 2019. Том 89. № 12. С. 1836–1842.