

Аннотация

монографии «Интегральные индуктивности с высокой симметрией»
авторы Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н., Панич А.Е.

В монографии разработаны аналитические методы расчёта интегральных индуктивностей различных симметрий как в низкочастотном, высокочастотном, так и сверхвысокочастотном диапазонах. Классы интегральных индуктивностей, для которых применимы полученные результаты, следующие:

- одиночные планарные токовые 2D-кольца с азимутальным направлением плотности тока;
- планарные индукторы на основе 2D-спиралей Архимеда и обобщённых спиралей;
- 3D-индукторы цилиндрической симметрии с аксиальным направлением в пространстве плотности тока;
- индукторы, использующие свойства отрезка коаксиального кабеля, индуктивностью которого можно управлять направлением и отношением токов в центральной жиле и оплётке;
- токовихревые индуктивности, выполненные в виде трубчатого и сплошного проводящего цилиндра с азимутальным направлением в пространстве плотности тока, как с частотной зависимостью, так с её отсутствием;
- индукторы, выполненные на планарном токовом слое, минимальная индуктивность которых для микронных технологий зависит только от отношения ширины к толщине проводящей ленты;
- токовихревые положительные и отрицательные пассивные многослойные индуктивности с высокой объёмной плотностью;
- индукторы, выполненные в виде ленточной микрокатушки, содержащей проводящую микроплёнку внутри катушки.

Аналитические методы расчёта позволяют провести сравнительный анализ между классами исследованных интегральных индуктивностей и определить наиболее интересные из них, которые рекомендуются использовать в различных технологических процессах для изготовления микросхем.

Наиболее значимыми, на наш взгляд, являются однослойные и многослойные индуктивности, состоящие из планарного индуктора, нагруженного на проводящую цилиндрическую плёнку наноразмерной толщины, либо нагруженную на многослойную цилиндрическую плёнку, состоящую из последовательности двойных слоёв различных металлов (например, Al, Cu в низкочастотном диапазоне).

Эксперименты, выполненные с однослойными и многослойными проводящими плёнками, а также с проводящими цилиндрическими стержнями, указывают на следующие особенности получения положительной или отрицательной токовихревой индуктивности. Особую роль в них играет геометрия токового индуктора. По геометрии

создаваемых силовых линий магнитного поля токовые индукторы следует классифицировать как открытые и закрытые.

К закрытым индукторам отнесём классические соленоиды конечной длины. В них средняя плотность силовых линий магнитного поля внутри всегда выше, чем снаружи. На изменение индуктивности соленоида и его частоты среза можно влиять различными способами. Наиболее существенные изменения можно получить, связывая магнитные силовые линии проводящими стержнями или плёнками с различным количеством слоёв. Плёнки устанавливаются поперек силовых линий во внутренней области соленоида.

Для тонкой плёнки, с наноскопической толщиной, положительная индуктивность соленоида может существенно возрасти. При этом должна возникнуть частотно-независимая индуктивность. Она не имеет частоты среза. В толстой или многослойной плёнке возможно появление состояния динамической индуктивности. На разных частотах суммарная индуктивность системы может иметь положительные значения индуктивности, отличающиеся от исходной индуктивности соленоида.

Расположение соленоида на полупроводящей или проводящей подложке связывает только незначительную часть внешних силовых линий магнитного поля. Это будет слабо изменять результирующую индуктивность соленоида и его частоту среза.

Заполнение проводником всего пространства внутри соленоида даёт максимальный эффект отрицательной индуктивности, вносимой проводящим стержнем. При этом суммарная индуктивность системы соленоид-стержень всегда будет уменьшена, но останется положительной.

К открытым индукторам следует отнести индукторы, выполненные в виде планарной спирали. Такой индуктор создаёт магнитные силовые линии, которые симметрично расположены в обоих полупространствах. Расположение с одной стороны такого индуктора проводящей плёнки с наноскопической толщиной, увеличит суммарную положительную индуктивность системы. Она будет частотно-независимой. Расположение с разных сторон спирального индуктора двух одинаковых проводящих плёнок с наноскопической толщиной ещё больше увеличит положительную суммарную индуктивность системы с сохранением её частотных свойств.

Расположение с одной стороны спирали либо толстой проводящей, либо многослойной плёнки может дать состояние динамической индуктивности. В этом случае суммарная индуктивность системы станет отрицательной и будет зависеть от частоты. Расположение с обеих сторон спирали таких плёнок ещё больше увеличит отрицательную индуктивность системы. Увеличивая число слоёв, можно пропорционально их количеству повышать суммарную отрицательную индуктивность открытой системы.

В качестве планарного индуктора могут быть использованы спирали либо одновитковые токовые кольца. Последние ещё больше увеличивают достигаемую объёмную плотность индуктивности. Как

показывают расчёты, проблема дальнейшей интеграции приемлемых значений положительной пассивной индуктивности порядка 10 нГн (на один слой до 500 нм толщины) в микрочипах может быть разрешена в направлении создания перспективной технологии «проводящая плёнка в токовом кольце», работающей в режиме наноразмерного эффекта вихревых токов Фуко.

Другая ветвь этой же многослойной (от 10 до 30 двойных слоёв) перспективной технологии позволит получать пассивные отрицательные индуктивности с предельно высокой объёмной плотностью $\sim 2,0 \cdot 10^7$ Гн/м³.

Сделаны оценки предельно достижимых положительных и отрицательных токовихревых индуктивностей для аналоговой микросхемотехники, использующей эти технологии. Показано, что в слое толщиной в 1 мм и площадью 1 см² можно разместить 16 000 индукторов в 40 слоях. Это позволит создать положительную макроиндуктивность, значение которой будет лежать на уровне 1 мГн. Для отрицательной индуктивности последнее значение будет больше на порядок.

На наш взгляд, последовательность реализации индуктивностей в контурных технологиях может быть следующей:

1. Освоить процессы создания многослойных плёночных индуктивностей по технологии, предложенной американскими исследователями из Огайо в 2009 году.

2. Повторить полученные ими результаты на многослойных плёнках Al-Cu, начиная с двухслойных структур и заканчивая структурами с 30 слоями.

3. Проверить существование наноразмерного эффекта положительной токовихревой индуктивности в однослойной проводящей плёнке, толщину которой можно изменять в широком диапазоне.

4. Показать зависимость индуктивности плёнки от её геометрических размеров.

5. Исследовать независимость индуктивности цилиндрической плёнки от значения её удельного сопротивления.

6. Определить зависимость частотного диапазона проводящей плёнки от значения её удельного сопротивления. При этом получить увеличение средней частоты рабочего диапазона с ростом удельного сопротивления плёнки.

7. Показать возможность реализации динамической токовихревой индуктивности на толстой однослойной плёнке, минимальное отрицательное значение которой зависит от частоты.

Надеемся, что предложенные в монографии физические основы создания интегральных индуктивностей высоких симметрий помогут перевести известные технологические процедуры её напыления на научно обоснованный уровень.