

АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІЖШАРОВИХ ПЕРЕТИНОК ДРУКОВАНИХ ПЛАТ НА ІНТЕГРАЛЬНУ ЦІЛІСНІСТЬ СИГНАЛІВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ІНТЕРФЕЙСІВ

Розглянуто зв'язок геометричних параметрів міжшарових перетинок та технології виготовлення, визначено електричну модель міжшарової перетинки, показано вплив параметрів моделі на інтегральну цілісність передачі сигналів.

The relation of geometrical parameters and production technology of buried vias was considered. The electrical model of buried via was defined. The effect of model parameters on the signal integrity was showed.

Ключові слова: міжшарова перетинка, друкована плата, зворотний струм, паразитні параметри, перехресні завади

Вступ

Термін "міжшарова перетинка" зазвичай означає металізований отвір у друкованій платі. Міжшарові перетинки використовуються для монтажу елементів із штировими выводами та для з'єднання друкованих провідників, що проходять у різних шарах плати. З точки зору інтегральної цілісності сигналів, обидва цих типа міжшарових перетинок поведуться однаково.

Якщо металізовані отвори міжшарових перетинок - занадто широкі, то на друкованій платі зменшується місце для прокладки сигнальних доріжок. Очевидно, що потрібні тонкі міжшарові перетинки, але наскільки тонкі? Чим тонші вдасться зробити міжшарові перетинки, тим більше друкованих доріжок вдасться прокласти (збільшити щільність трасування). Конструктори, що прагнуть знизити габарити виробу, неминуче будуть змушені робити міжшарові перетинки усе тоншими і тоншими.

Чим менші міжшарові перетинки, тим менше їхні паразитні параметри. Це означає, що на високих частотах вони працюють краще. Домогтися найвищої швидкодії можна тільки за умови використання найтонших міжшарових перетинок.

Звичайно, тонкі міжшарові перетинки обходяться дорожче у виробництві. Чим вища точність виготовлення, тим вища вартість виробництва - це основний принцип будь-якої технології, і міжшарові перетинки не є в цьому плані виключенням. Отже, міжшарові перетинки підкоряються трьом правилам:

- чим тонші перетинки, тим менше місця вони займають;
- чим тонші перетинки, тим менші паразитні параметри з'єднання ;
- чим тонші перетинки, тим дорожче обходиться їхнє виробництво.

Метою статті є визначення аспектів впливу міжшарових перетинок на якість передавання сигналів у високошвидкісних інтерфейсах, аналіз впливу через побудову моделі міжшарової перетинки, подання рекомендацій що до проектування друкованих плат із використанням міжшарових перетинок у колах високошвидкісних інтерфейсів.

Діаметр отвору міжшарової перетинки

Наскрізний металізований отвір міжшарової перетинки повинен бути достатнім по розміру для того, щоб у нього помістилися виводи елемента. Діаметр готового отвору повинен перевищувати розмір виводу елемента, що вставляється в його. У випадку типових друкованих плат надлишковий діаметр, необхідний для гарної пайки, перебуває в межах від 0,010 до 0,028 дюймів, залежно від технології пайки. Можливості зменшення діаметра міжшарових перетинок, призначених для монтажу компонентів, невеликі.

Точний діаметр трасувальних міжшарових перетинок, використовуваних для з'єднання друкованих доріжок, визначити складніше. Мінімумально допустимий діаметр трасувальних міжшарових перетинок обмежений можливостями технології свердління й металізації.

Чим тонше отвір, тим тонше повинне бути свердло, а тонкі свердла ламаються частіше, ніж товсті, міцні свердла. Виробники друкованих плат були б просто щасливі, був би діаметр отворів хоча б не менше 0,050 дюйма. На жаль, такий великий діаметр отвору істотно обмежив би щільність трасування.

На свердління тонких отворів потрібно також більше часу. Свердління широких отворів здійснюється пакетним способом, тобто одночасно обробляється стопка друкованих плат. Тонкі свердла при глибокому свердлінні неминуче "веде" убік від осі (тонкі свердла вигинаються в міру поглиблення). Тому тонкі отвори доводиться свердлити меншими пакетами, що збільшує час виготовлення.

Нанести металізацію гальванічним способом на стінки глибокого й тонкого отвору по всій його глибині не вдається. Неможливо забезпечити рівномірну товщину металізації отвору глибиною, що перевищує його діаметр більш ніж у шість разів. Для стандартної товщини друкованої плати 0,063 дюйма це обмежує мінімальний діаметр отвору на рівні 0,010 дюйма, що ще залежить від старанності настроювання технологічного устаткування й необхідного відсотка виходу придатних виробів. Всі ці фактори збільшують вартість виготовлення тонких міжшарових перетинок.

Під час замовлення виготовлення печатних плат не слід змішувати аспекти свердління та металізації із можливостями технології виготовлення рисунку друкованої плати. Ці два питання взаємозалежні, але лише частково. Для правильного замовлення друкованої плати із оптимальними параметрами потрібна таблиця вартості просвердленого отвору залежно від його діаметра і таблиця вартості квадратного дюйма площі друкованої плати залежно від ширини друкованої доріжки. За допомогою цих двох таблиць й інформації, наведеної нижче, можливо вибрати найкращу комбінацію розміру отвору, ширини доріжки й кількості шарів для конкретного завдання. У більшості виробників друкованих плат вартість виготовлення росте пропорційно кількості шарів плати.

Які ж розумні межі розмірів отворів? У військовому стандарті MIL-STD-275E (США) перераховані три категорії допустимих відхилень розміру отвору: кращої, стандартної й зниженої технологічності. Кращі допуски у виробництві дотримувати простіше всього (і дешевше всього). У категорії зниженої технологічності допуски набагато жорсткіші й

вартість виробництва відповідно до них звичайно вище. У стандарті IPC-D-300G (Interconnections Packaging Circuitry Standard — стандарт на між'єднання елементів електронних схем) наведена аналогічна інформація для виробів цивільного призначення. У таблицях представлена мінімальна вибірка даних зі стандарту MIL-STD-275E.

Таблиця 1. Стандарт MIL-STD-275E. Діаметр отвору

	Бажаний	Стандартний	Пониженої технологічності	<i>T</i> – товщина печатної плати
Мінімальний діаметр отвору	<i>T</i> /3	<i>T</i> /4	<i>T</i> /5	

Таблиця 2. Стандарт MIL-STD-275E. Допуски на параметри отвору

	Бажаний	Стандартний	Пониженої технологічності
Допуск на товщину металізації	0,0028	0,0021	0,0014
Точність дотримання діаметру металізованого отвору			
Діаметр 0,015-0,030 дюйма	0,008	0,005	0,004
Діаметр 0,031-0,061 дюйма	0,010	0,006	0,004
Допуск на поєднання отвору			
Розмір плати <12 дюймів	0,009	0,006	0,004
Розмір плати >12дюймів	0,012	0,009	0,006
Мінімальна ширина контактної майданчики металізовано отвору			
Внутрішній шар плати	0,008	0,005	0,002
Зовнішній шар плати	0,010	0,008	0,005

Таблиця 3. Стандарт MIL-STD-275E. Мінімальний зазор

	Бажаний	Стандартний	Пониженої технологічності
Повітряний зазор при пайці хвилею	0,020	0,010	0,005

Ємність міжшарової перетинки

Будь-яка міжшарова перетинка має паразитну ємність стосовно землі. Маючи невеликі фізичні розміри, міжшарові перетинки поведуться значною мірою як елементи із зосередженими параметрами. Паразитна ємність міжшарової перетинки з точки зору інтегральної цілісності сигналів викликає в основному подовження фронтів цифрових сигналів, формуючи, разом із активним опором доріжки інтегруючи ланку.

Паразитну ємність можна знайти за наступною формулою:

$$C(n\phi) = \frac{1.41\epsilon_r T D_1}{D_2 - D_1} \quad (1)$$

де ϵ_r — відносна діелектрична проникність матеріалу (матеріалів) друкованої плати

T — товщина друкованої плати, дюйми;

D_1 — діаметр контактної майданчики, що оточує міжшарову перетинку, дюйми;

D_2 - діаметр зазору навколо міжшарової перетинки в опорному шарі (шарах) землі, дюйми;

Ємність, внесена контактними майданчиками, значно зростає у випадку вузького зазору. Якщо для збереження нерозривності шару землі приходиться робити незначні зазори, потрібно зменшити розміри контактних майданчиків, розташованих в опорному шарі землі або зовсім уникнути їх використання. Розриви фланців в опорному шарі землі ніяк не відіб'ються на роботі міжшарових сигнальних перетинок.

Формула (1) отримана в припущенні, що контактні майданчики міжшарової перетинки є в усіх, без винятку шарах. Іноді конструктори не закладають контактні майданчики в тих шарах, які не з'єднані з доріжками, небагато зменшуючи тим самим паразитну ємність. На практиці, у багатьох випадках паразитна ємність настільки мала, що її можна не враховувати.

Якщо неодмінно необхідно заздалегідь знати величину ємності міжшарової перетинки, можливо використати її збільшену фізичну модель. Під час створення фізичного макету перетинки використовується принцип масштабування: ємність пропорційно збільшеного макета міжшарової перетинки або друкованої доріжки в X раз перевищує ємність реального об'єкта, де X - масштаб макета.

Наприклад, на рис. 1 показаний простий макет міжшарової перетинки, виготовлений з алюмінієвої фольги і картону. Це - модель трасувальної міжшарової перетинки плати поверхневого монтажу в масштабі 100:1. Центральна трубка, що імітує внутрішню стінку металізованого отвору, має діаметр 1,6 дюйма. Контактні майданчики на кінцях трубки мають діаметр 2,8 дюйми. Зазор в опорному шарі землі має діаметр 5,0 дюймів. За умови таких розмірів, виміряна ємність моделі становить 11 пФ. З урахуванням масштабу 100:1, ємність реальної міжшарової перетинки за умови, що вона оточена повітряним діелектриком, становить 0,11 пФ. Оскільки в дійсності міжшарова перетинка оточена діелектриком FR-4 з відносною діелектричною проникністю 4,7, те її ємність становить приблизно 0,5 пФ. Значно легше точно виміряти порівняно більшу

ємність 11 пФ, чим ємність реальної готової міжшарової перетинки. Крім того, виготовлення макета - досить захоплююче заняття.

Зіставимо обмірюваний результат з результатом, отриманим по формулі (1):

$$C = \frac{(1,4)(4,7)(0,063)(0,028)}{0,050 - 0,028} = 0,53(n\Phi) \quad (2)$$

Отже формула дає достатньо точний результат для практичних розрахунків .



Рис.1. Модель міжшарової перетинки

Який вплив зробить така між шарова перетинка на лінію передачі хвильовим опором 50 Ом? Відповідно до формули збільшення часу наростання перехідної характеристики лінії, обмірюване по рівнях 10-90%, викликане впливом ємності міжшарової перетинки становитиме [2]:

$$T_{10-90} = 2,2C(Z_0/2) = (2,2)(0,5)(50/2) = 27,5(nc) \quad (3)$$

Двадцять сім пікосекунд - це, поза всяким сумнівом, малюсінкий інтервал часу (3), але у випадку високошвидкісних інтерфейсів вплив такої затримки може бути вирішальним. Якщр доводиться постійно розраховувати ємності міжшарових перетинок площадок, доцільно використовувати програмне забезпечення моделювання електромагнітних полів. Подібні пакети прикладних програм (за умови досить потужного комп'ютера) забезпечують точний розрахунок ємності й індуктивності тривимірних структур, до яких і відносяться міжшарові перетинки.

Індуктивність міжшарової перетинки

Будь-яка міжшарова перетинка крім ємності має також паразитну послідовну індуктивність. Із практичної точки зору для проектування печатних плат більше важлива індуктивність міжшарових перетинок, а не їхня ємність. Основним ефектом, створюваним власною послідовною індуктивністю міжшарових перетинок, є зниження ефективності блокувальних конденсаторів у колах живлення.

Призначення блокувальних конденсаторів полягає в тому, щоб замкнути між собою по високій частоті два опорних шари живлення й землі. Уявимо собі, що інтегральна схема, виводи якої з'єднані, як показано на рис.2, із шарами живлення й землі у точці А, захищена ідеальним блокувальним конденсатором поверхневого монтажу, включеним між опорними шарами у точці В.

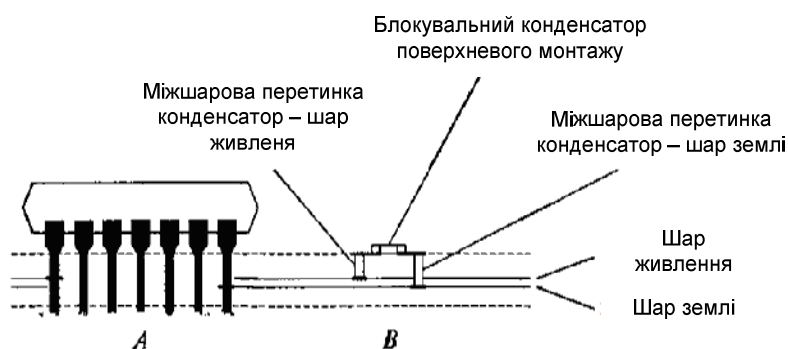


Рис.2. Схема розташування блокувального конденсатору и міжшарових перетинок живлення та землі

У цьому випадку, у точці підключення мікросхеми опір між шарами живлення та землі по високій частоті повинен дорівнювати нулю. Однак, ненульова індуктивність наскрізних міжшарових перетинок, якими конденсатор з'єднаний із опорними шарами, створює невеликий, але помітний вплив. Ця індуктивність становить приблизно [2]:

$$L(n\Gamma H) = 5,08h \left[\ln \left(\frac{4h}{d} \right) + 1 \right] \quad (4)$$

де h — довжина міжшарової перетинки, дюйми;

d — діаметр міжшарової перетинки, дюйми.

Оскільки у формулі (4) стоїть логарифмічна функція, зміна діаметра міжшарової перетинки не робить помітного впливу на величину індуктивності. Помітно змінити її можна тільки за рахунок зміни довжини міжшарової перетинки.

Розрахуємо індуктивність для випадку $h = 0,063$ та $d = 0,016$ (дюймів):

$$L = (5,08)(0,063) \left[\ln \left(\frac{4(0,063)}{0,016} \right) + 1 \right] = 1,2 \text{ нГн} \quad (5)$$

У випадку типової тривалості фронту цифрового сигналу для швидкісних інтерфейсів $T_{10-90} = 1 \text{ нс}$, індуктивний опір перетинки складатиме:

$$x_l = \frac{\pi L}{T_{10-90}} = 3,8 (\text{Ом}) \quad (6)$$

Опір 3,8 Ом може виявитися недостатньо низьким для ефективного шунтування кола живлення мікросхеми по високій частоті. Необхідно також урахувати, що блокувальний конденсатор звичайно підключається до опорних шарів живлення й землі двома міжшаровими перетинками, у результаті паразитна індуктивність зростає вдвічі. Послабити цей ефект можна, встановлюючи блокувальні конденсатори на тій стороні плати, до якої ближче розташовані шари живлення й землі. І, нарешті, друковані доріжки, прокладені між контактними майданчиками блокувального конденсатора й міжшаровими перетинками, вносять додаткову індуктивність. Ці доріжки обов'язково повинні бути більше широкими, чим звичайно.

Можна домогтися дуже низькоімпедансного з'єднання шарів живлення й землі, з'єднавши їх безліччю блокувальних конденсаторів. Щоб у самому грубому наближенні оцінити ефект такої конструкції для цифрової схеми, припустимо, що шари живлення й землі являють собою ідеальні провідники, що володіють нульовою індуктивністю. Під час оцінювання враховуються тільки індуктивності блокувальних конденсаторів, сусідніх з ними доріжок і міжшарових перетинок. Всі блокувальні конденсатори, що перебувають у межах ділянки певного радіуса, будуть діяти так, начебто вони включені паралельно, тим самим знижуючи імпеданс між шарами живлення й землі. Ефективний радіус, у межах якого це допущення справедливо, становить $l/12$, де l — електрична довжина, що відповідає тривалості фронту сигналу. Всі конденсатори, що перебувають у межах ділянки діаметром $l/6$, поведуться як кола із зосередженими параметрами.

Для сигналу із тривалістю фронтів 1 нс, у випадку діелектрика FR-4, ефективна електрична довжина становить приблизно $l = 6$ дюймів. Таким чином, у цьому випадку при розміщенні блокувальних конденсаторів із кроком більше $l/12 = 0,5$ дюйма, виграшу не буде.

За умови зменшення тривалості фронтів сигналів проблема захисту від завад по колах живлення стає усе складнішою. Чим коротше стають фронти, тим менше стає ефективний радіус шунтування. Кількість блокувальних конденсаторів, що попадають у межі ефективного радіуса, за інших рівних умов, зменшується пропорційно квадрату тривалості фронтів сигналів. Ця проблема додатково ускладнюється тим, що одночасно зі зменшенням тривалості фронтів сигналу зростає частота зламу обвідної спектру сигналу, у результаті чого зростає індуктивний опір міжшарової перетинки. У результаті ефективність роботи конкретної конфігурації блокувальних конденсаторів, що успішно справляється зі своїм завданням у певному частотному діапазоні, при зменшенні тривалості фронтів сигналу вдвічі, знижується у вісім разів!!! Цей принцип масштабування дозволяє успішно використати досвід, придбаний у процесі роботи в одному частотному діапазоні, при переході в інший частотний діапазон.

Зворотні струми й міжшарові перетинки

У багатошарових друкованих платах з декількома опорними шарами землі необхідно ретельно аналізувати шляхи зворотних струмів. Сигнальний високочастотний струм високошвидкісних інтерфейсів протікає від джерела живлення у бік навантаження по сигнальному провіднику і повертається до джерела (у випадку однопровідної лінії) через потенційні шари живлення та землі утворюючи зворотний струм. За умови суцільної металізації, наявності блокувальних конденсаторів та міжшарових потенційних перетинок зворотний струм має багато можливих шляхів протікання, але «обирає» шлях із найменшою індуктивністю [1]. Така умова еквівалентна умові розташування шляху протікання зворотного струму, що розташовано якомога ближче до сигнального провідника. Таким чином струм сигнального провідника та зворотний струм утворюють контур струму, конфігурація якого може визначатись міжшаровими перетинками та їх розташуванням на друкованій платі.

Звичайно, будь-який контур із струмом створює перехресні завади що до інших провідників, і рівень завад буде залежати від геометричної конфігурації такого контуру. Відомо, що два контури струму, що володіють однаковою індуктивністю, при рівності струмів, створюють однакові магнітні потоки. Отже, обидва контури струму будуть створювати однаковий рівень електромагнітного поля. Звідси отримуємо цікавий висновок: рівень електромагнітного поля, створюваного доріжкою, прокладеною у внутрішньому шарі друкованої плати, не відрізняється від рівня електромагнітного поля, створюваного доріжкою, прокладеною в зовнішньому шарі друкованої плати. Це справедливо особливо для друкованих доріжок, які розташовані на краю плати. Суцільні шари землі, розташовані паралельно вектору магнітного потоку, що генерується, практично не екранують його.

Зменшення перехресних завад та сторонніх випромінювань можливо забезпечивши вільний шлях зворотному струму із одного шару землі в інший, врахувавши наступні правила.

1. Змінити конструкцію друкованої плати таким чином, щоб зворотним струмам високошвидкісних сигналів взагалі не потрібно було переходити з одного шару землі в інший. Тобто сигнальні провідники мають бути розташовані в одному шарі плати.

2. Обмежити можливості трасування друкованих провідників таким чином, щоб вони, переходячи із шару в шар, завжди залишалися з однієї й іншої сторони ближче всього до тому самому шару землі. Це правило дозволяє використати природно згруповані пари шарів вертикального й горизонтального розведення. Цей варіант майже настільки ж ефективний, як і варіант (1).

3. Поряд з кожною міжшаровою перетинкою, що з'єднує сигнальні доріжки, передбачати міжшарову перетинку, що з'єднує опорні шари землі, спеціально для того, щоб забезпечити зворотному струму шлях із шару в шар слідом за сигнальним провідником.

4. Розташовувати якнайбільше міжшарових перетинок, що з'єднують шари землі, по всій друкованій платі. У цьому випадку незалежно від того, де стоїть міжшарова перетинка сигнальної доріжки, для зворотного струму завжди знайдеться

поблизу земляна міжшарова перетинка, по якій він зможе перейти слідом за сигналом, не ухиляючись далеко убік від сигнальної доріжки.

5. Не слід використати як шляхи поворотних струмів захисні доріжки. На перший погляд це гарна ідея, але вона виявляється марної на практиці. Насамперед, захисні доріжки впливають тільки в тому випадку, коли вони розташовані впритул до сигнальних доріжок. Але якщо використати як шлях зворотного струму таку захисну доріжку, що перебуває досить близько до сигнальної доріжки, то вона одночасно виявляється досить близькою для того, щоб вплинути (знизити) на хвильовий опір друкованої лінії передачі. У третій, для того щоб домогтися помітного ефекту від такого варіанту, необхідно, щоб імпеданс таких доріжок був досить низьким, іншими словами вони повинні бути дуже й дуже широкими. За умови наявності в платі суцільних шарів землі користі від захисних доріжок немає ніякої.

Висновки

1. Встановлено, що для якісного функціонування високошвидкісних інтерфейсів на печатних платах за умови існування у провідниках інтерфейсу міжшарових перетинки, діаметр перехідних отворів із технологічних міркувань має становити не більше 20% від товщини плати.

2. Встановлено, що паразитні параметри перехідного отвору спричиняють порушення роботи високошвидкісних інтерфейсів через «затягування» фронтів сигналів, що викликано паразитною ємністю і становить десятки піко секунд, зменшення потенціалу землі, через паразитну індуктивність, що становить одиниці наногенрі. Подано рекомендації щодо усунування негативного впливу паразитної ємності та індуктивності.

3. Встановлено механізм впливу міжшарової перетинки на рівень перехресних завад, подано рекомендації що до проектування печатних плат із високошвидкісними інтерфейсами в аспектах встановлення та розміщення міжшарових перетинки.

Література

1. Джонсон Говрад В., Грэхем, Мартин. Конструирование высокоскоростных цифровых устройств: начальный курс черной магии.:Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006, - 624с.:ил. – Парал. тит. англ.

2. Джонсон Говрад В., Высокоскоростная передача цифровых данных: высший курс черной магии.:Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005, - 1024с.:ил. – Парал. тит. англ.