

МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ПРОВОДЯЩИЕ ПЛЕНОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ МИКРОСХЕМ

С. П. Арсеничев, Е. В. Григорьев, С. А. Зуев, В. В. Старостенко, Е. П. Таран
Таврический университет имени В.И. Вернадского

Статья получена 28 апреля 2014 г.

Аннотация. В работе рассмотрены и систематизированы механизмы воздействия электромагнитных полей на проводящие структуры интегральных микросхем. Выявлены особенности развития деградационных процессов в тонких пленочных структурах. Получены значения толщин проводящих пленок, при которых наблюдается процесс преобразования энергии ЭМП в акустические волны.

Ключевые слова: проводящие пленочные структуры, механизмы воздействия, преобразование энергии.

Abstract. The influence mechanisms of the electromagnetic fields are in-process considered and systematized on the conducting structures of integral microcircuits. The features of development of degradation processes are educed in thin film structures. The values of thicknesses of conducting films at that there is a process of transformation of energy of the electromagnetic field in acoustic waves are got.

Keywords: conducting film structures, influence mechanisms, transformation of energy.

Введение

При воздействии мощных электромагнитных полей (ЭМП) на электронную аппаратуру одной из причин ее выхода из строя являются прожоги контактных площадок и проводящих дорожек интегральных микросхем (ИМС) - проводящих микроструктурных элементов. Основным механизмом воздействия предполагается антенный: к выводам ИМС или отдельным участкам прикладываются дополнительные напряжения (образуются разрядные цепи), что приво-

дит к разрушению металлизации или полупроводниковых структур. Цепи пробоя могут замыкаться через ток смещения в диэлектрических пленках или через полупроводниковые структуры. Для проводников и полупроводниковых приборов справедлив критерий Вунша-Белла [1,2]: стойкость (время выхода элемента из строя) однозначно связана со значением удельной плотности тока через поперечное сечение проводника или полупроводникового прибора. Данный критерий является интегральным – в нем не рассматривается физика процессов, предшествующая выходу структур из строя. Более подробно модели процессов в металлизации и полупроводниковых приборах в напряженных токовых и тепловых режимах рассмотрены в [3-5].

Моделирование электротепловых процессов показывает, что на разрушения металлизации в значительной степени влияют пространственная и омическая неоднородности – они ускоряют деградиационные процессы [6]. Анализ физических процессов показывает, что наряду с основным (антенным) механизмом в развитии процессов в проводящих пленках могут участвовать: 1) механизм, связанный с непосредственным воздействием электрической составляющей электромагнитного поля падающей электромагнитной волны (скин-эффект) и 2) механизм, обусловленный преобразованием энергии электромагнитного поля в энергию акустических волн.

Целью данной работы является: 1) систематизация подходов к рассмотрению физических процессов в проводящих микроструктурных элементах микросхем при воздействии электромагнитных полей; 2) исследование преобразования энергии СВЧ в акустические волны в тонких проводящих пленках.

Антенный механизм

Непосредственное воздействие импульсных электромагнитных полей на полупроводниковые приборы или их составляющие ряд исследователей заменили имитацией - подачей на выводы прибора или участка металлизации напряжения в виде функции включения [1, 2]. Время жизни прибора τ зависит от величины поданного напряжения, что равносильно действию на прибор (участок металлизации) прямоугольного импульса длительностью τ . При ими-

тации воздействия не учитывается ряд факторов, в частности, поляризационный (взаимная ориентация поля и прибора или участка металлизации). Можно считать, что эти результаты справедливы для случая, когда к прибору или участку металлизации прикладывается максимальное напряжение воздействующего ЭМП. Для других ориентаций прибора напряжение, приложенное к выводам или участку цепи, определяется через проекцию вектора напряженности электрической компоненты поля на направление вдоль участка цепи.

В соответствие с результатами работ [1, 2] при имитации воздействия ЭМП чуть более 60% полупроводниковых приборов и ИМС выходят из строя по причине прожога металлизации, из этого количества ИМС более 50% выходят из строя по причине прожога контактных площадок. Экспериментальные исследования по воздействию импульсных ЭМП на современные ИМС (микропроцессоры, микросхемы памяти, АЦП, ЦАП и др.) в волноводном тракте дают подобные результаты [7, 8]. Исследования проводились в 10-ти сантиметровом диапазоне, основное ограничение на ИМС – поперечные размеры волновода должны быть много больше площади любой из граней ИМС.

Для современных ИМС с многослойной металлизацией возможные варианты образования цепей пробоя показаны на рис.1,а (1 - «проводник-диэлектрик-проводник» и 2 - «проводник – полупроводниковый прибор - проводник»). Эквивалентная схема цепи пробоя, образованной проводящими и диэлектрическими элементами (ток смещения) ИМС, показана на рис.1,б. Для дальнейшего рассмотрения электротепловых процессов в металлизации можно произвести ее дискретизацию (представить эквивалентной сеткой сопротивлений) и решать уравнение теплопроводности с источниками, определяемыми величиной приложенного напряжения, которое, в свою очередь, находится из решения дифракционной задачи [9, 10, 12]. Кроме геометрических размеров на стойкость проводящих структур сильно влияет омическая и пространственная неоднородность пленочных структур [11]. Подобного рода модель при обоснованном определении эквивалентной емкости разрядной цепи позволяет исследовать влияние характеристик воздействующего поля (длительности и формы

импульса, скважности и импульсной мощности) и характеристик проводящих структур (геометрических размеров, проводимости, пространственной и омической неоднородности) на динамику развития электротепловых процессов в проводящих структурах ИМС [6].

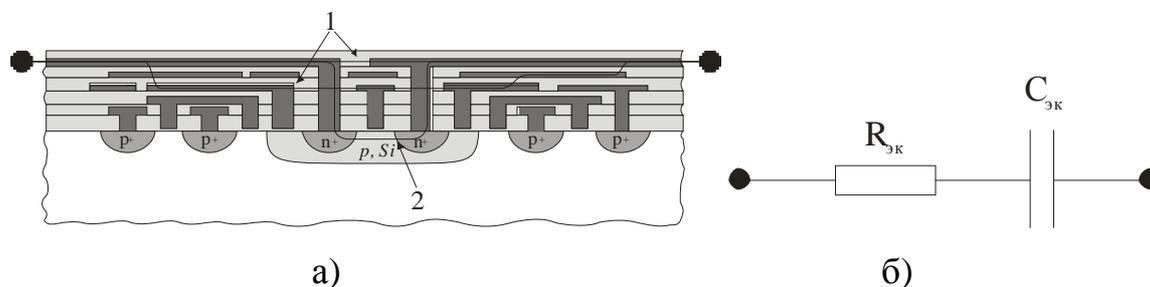


Рис.1. Цепи разряда в кристалле современных микросхем (а) и их эквивалентная схема (б)

Непосредственное воздействие ЭМП на проводящие структуры ИМС

Кроме основного антенного механизма при воздействии ЭМП на проводящие структуры ИМС возможен их разогрев и разрушение за счет непосредственного воздействия поля и конечной проводимости проводящих пленок (скин-эффект). Расчеты, проведенные в приближении плоской волны для однородной пленки, показывают, что время прожога однородных пленок при предельных значениях напряженности электрической компоненты поля (30 кВ/см) и стандартных значениях электропроводности составляет доли мс. В тоже время ИМС выходят из строя при значительно меньших значениях полей (времена - порядка мкс) [3]. Омическая и пространственная неоднородности пленок в значительной мере влияет на уменьшение времени прожога пленок при воздействии ЭМП.

На частоте 3 ГГц глубина скин слоя при удельной проводимости $\sigma = 5,7 \cdot 10^7$ См/м (для медных пленок) составляет 1,2 мкм, а при $\sigma = 10^6$ См/м – 9,18 мкм. Для более детального исследования данного механизма и анализа развития электротепловых процессов в проводящих пленках необходимо совместно решать дифракционную задачу и уравнение теплопроводности.

Преобразование энергии ЭМП в энергию акустических волн

В современных микросхемах с высокой степенью интеграции используются нанометровые проводящие пленки, отличительной чертой которых является значительное поглощение энергии ЭМП при толщинах менее 50 нм [13]. Подобные свойства тонких проводящих пленок были известны и использовались в оптике еще в начале прошлого века [14], в то время как в электронике подошли к возможному проявлению и использованию этих явлений в пленках в последнее время [15]. В работах [13-15] достаточно подробно описаны особенности структуры и строения тонких пленок, а также рассмотрены вопросы механического и теплового разрушения пленок при подаче на них постоянного напряжения. Особенность нанометровых пленок заключается в их структуре, которая в свою очередь, зависит от многих факторов, в частности от материала пленки и технологии. Сильное поглощение в тонких пленках (до 50%) имеет место при толщинах пленок d менее 10 нм и обусловлено преобразованием энергии электрического (электромагнитного) поля в энергию акустических волн [13-15]. Существующие теории предполагают, что подобное преобразование энергии не зависит от частоты электромагнитного поля.

При воздействии ЭМП на ИМС достаточно сложно выделить вклад каждого из механизмов в развитие деградационных процессов в проводящих пленках. Проявление механизмов, связанных с конечной проводимостью пленок и преобразованием энергии ЭМП в акустические волны можно исследовать на более простых металлодиэлектрических структурах (МДС), представляющих собой диэлектрическую подложку на которую нанесена проводящая пленка. В работе использовались МДС с подложками из боросиликатного стекла или ситалла толщиной 0,7...1 мм размером 18×18 мм. Особых требований к пленкам из меди, алюминия и никрома не предъявлялось. Пленки наносились методом магнетронного напыления, толщина пленок определялась по времени напыления и варьировалась от 5 нм до 1 мкм. Воздействию мощных ЭМП на МДС предшествовали исследования на панорамном измерителе Р2-56.

На рис.3 представлены зависимости ослабления $A = 10 \lg \left(\frac{P_{trans}}{P_{inc}} \right)$ от толщины пленок, где P_{trans} и P_{inc} - мощности прошедшей и падающей волн. При толщинах пленок менее 50 нм отражение практически отсутствует, а прошедшая волна характеризует рассеиваемую (поглощенную) в пленке волну. Уже при толщинах менее 50 нм имеет место заметное преобразование энергии ЭМП в акустические волны (рис.2).

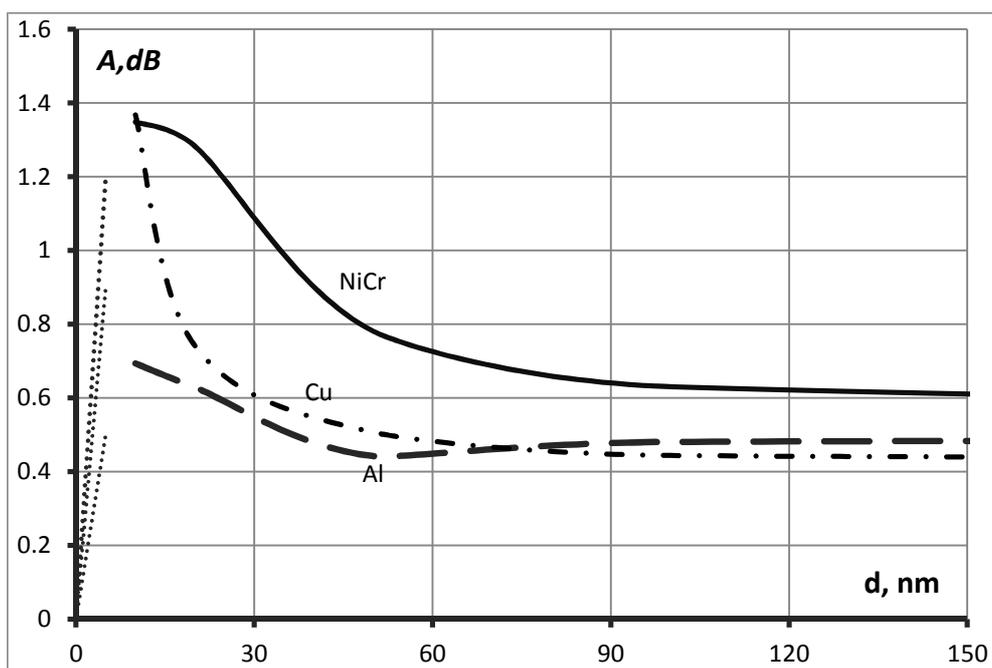


Рис.2. Зависимости ослабления (A) от толщины напыления для пленок из Al, Cu, NiCr ($\lambda \approx 10$ см)

Присоединение выводов ИМС к контактными площадкам производится термокомпрессионным методом с изменением структуры контакта пленки: толщина контакта пленки при этом может изменяться от исходной в значительных пределах (единицы, сотни нм). С учетом этого участки контактных площадок нанометровой толщины являются деградационными центрами при воздействии ЭМП на ИМС.

Воздействие мощных ЭМП осуществлялось на длине волны $\lambda = 10$ см в волноводе сечением 34×72 мм. Грань МДС с проводящей пленкой располагалась перпендикулярно оси волновода, мощность магнетрона составляла 700Вт

(непрерывный режим), время воздействия было кратным 1 с. Пленки из меди и нихрома мало меняют свои характеристики со временем, в то время как пленки из алюминия очень быстро корродируют [13] и в этом случае исследования проводятся с пленками из окислов алюминия. Основными задачами при воздействии мощных ЭМП были: 1) исследование отличий в пробоях пленок при постоянных напряжениях и при воздействии ЭМП СВЧ; 2) определение предельных толщин пленок, при которых происходит преобразование энергии ЭМП в акустические волны.

Характерной чертой преобразования энергии ЭМП в акустические волны являются процессы механических и тепловых разрушений (рис.3). При этом механические и тепловые разрушения происходят, как правило, посередине МДС, перпендикулярно вектору напряженности электрической компоненты поля.

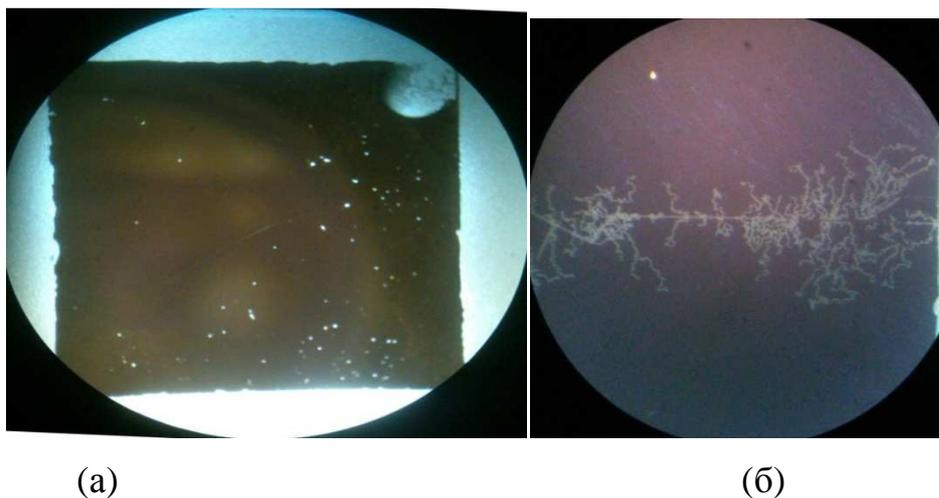


Рис.3. МДС (а) и ее фрагмент (б) после воздействия в течении 1с.

На рис.3,а показана вся МДС, а на рис.3,б фрагмент пленки при 24-х кратном увеличении с развитой структурой теплового и механического пробоя. Обычно при преобразовании энергии ЭМП в акустические волны вначале происходят механические разрушения, а затем электротепловые. При подаче на тонкую пленку постоянного напряжения для разрушения пленки необходимо увеличивать напряжение при уменьшении толщины пленки [11]. Отличительной особенностью преобразования энергии СВЧ ЭМП является обратная зави-

симось в сравнении с преобразованием энергии электростатического поля: чем тоньше пленка, тем меньше импульсная мощность (время воздействия монохроматических полей) необходима для разрушения пленки. Такого рода зависимость имеет место для пленок толщиной от 5 нм и выше.

Было проведено более 100 «горячих» экспериментов. Для фиксированной мощности падающей волны (≈ 700 Вт) предельные значения толщин пленок, после которых устанавливается тепловой баланс с окружающей средой (нет прожога пленки), это:

- $d > 300$ нм для алюминия;
- $d > 600$ нм для нихрома;
- $d > 700$ нм для меди.

Для пленок с меньшей толщиной имеет место типичная картина механических и тепловых разрушений пленок, с последующим переходом в электро-тепловые и механические разрушения подложки (растрескивание, рис.4).

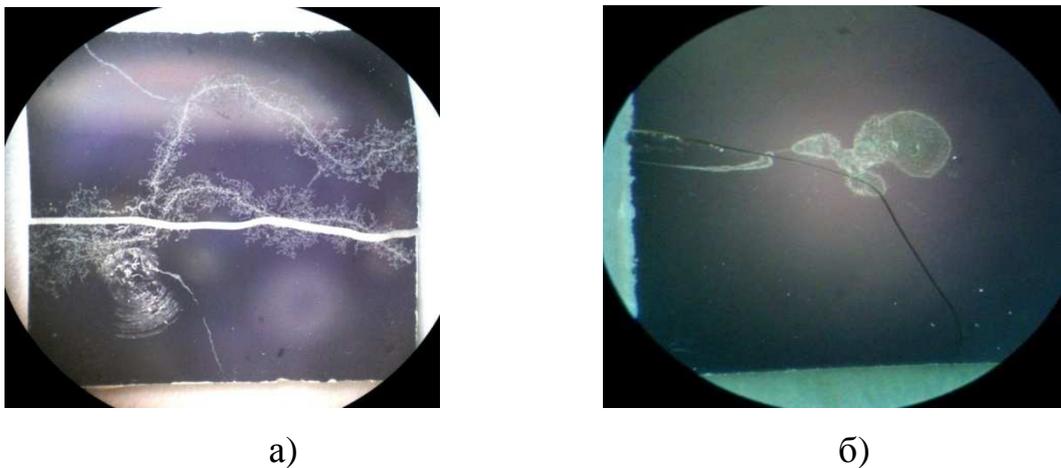


Рис.4. Механические и тепловые разрушения пленок (а – пленка Al, толщина $d=50$ нм, время воздействия $t=5$ с; б – пленка NiCr, толщина $d=70$ нм, время воздействия $t=3$ с).

В соответствие с [13] при толщинах пленок более 60 нм происходит наращивание слоев, т.е. пленка становится относительно однородной. Такая пленка (при подаче постоянного напряжения) «закорачивает» пространство, не нагревается и не разрушается. Как показали экспериментальные исследования, плен-

ки из меди толщиной менее 700 нм разрушаются так, как это происходит при преобразовании энергии ЭМП в акустические волны. Полученные результаты демонстрируют отличия в характеристиках пленок в результате электрического пробое при постоянном напряжении и воздействии СВЧ ЭМП.

Заключение

В работе проанализированы наиболее значимые механизмы воздействия электромагнитных полей на проводящие структуры микросхем. Проведенные ранее исследования по воздействию ЭМП на микросхемы, а также предварительные расчеты, позволяют сделать заключение, что наибольший вклад на начальной стадии разрушения металлизации ИМС вносят механические, а затем и тепловые прожоги, которые связаны с преобразованием энергии ЭМП в энергию акустических волн. Эти деградационные центры ускоряют процессы разрушения металлизации при «антенном» механизме воздействия.

Воздействие электромагнитных полей на проводящие пленки металлodieлектрических структур показали, что их разрушение вследствие преобразования энергии ЭМП в акустические волны, отличается от разрушения при подаче постоянного напряжения. В особой мере эти отличия проявляются для проводящих пленок толщиной более 60 нм: при подаче постоянного напряжения пленки толщиной более 60 нм не разрушаются. В то время при воздействии ЭМП характер разрушения пленок толщиной менее 300 нм для алюминия, менее 600 нм для никрома и менее 700 нм для меди соответствует разрушениям при преобразовании энергии ЭМП в акустические волны.

Для более глубокого исследования процессов в тонких пленках при воздействии ЭМП необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований и создание модели, учитывающей как структуру пленок, так и зависимость механических и тепловых процессов в пленках от частоты воздействующего электромагнитного поля.

Литература

1. *D.C. Wunsch, R.R. Bell.* Determination Of Threshold Failure Of Semiconductor Diodes And Transistors Due To Pulse Voltages // IEEE Trans. 1968. V. NS-15. N 6. P. 244 - 259.
2. *Antinone J.* Electrical Overstress Protection for Electronic Devices. New York, 1986. P. 387.
3. *Старостенко В.В., Таран Е.П., Григорьев Е.В., Борисов А.А.* Воздействие электромагнитных полей на интегральные микросхемы // Измерительная техника. 1998. № 4. С. 65 - 67.
4. *Старостенко В.В., Таран Е.П., Чурюмов Г.И., Зуев С.А., Ахрамович Л.Н.* Влияние толщины металлизации на стойкость интегральных микросхем при воздействии электромагнитных полей // Прикладная радиоэлектроника. 2003. Т.2. № 1. С. 88 – 92.
5. *Churyumov G., Starostenko V., Tereshenko V., Unzhakov D., Zuev S.* Wunsch-Bell Criterial Dependence for Si and GaAs Schottky-Barrier Field – Effect Transistors // Ultra-Wideband, Short-Pulse Electromagnetics 9. Springer. 2010. P. 369 – 374.
6. *Старостенко В.В., Глумова М.В., Рукавишников А.В., Таран Е.П.* Динамика развития необратимых деградационных процессов в проводящих микроструктурах интегральных микросхем при воздействии импульсных электромагнитных полей // Вестник ХНУ. Радиофизика и электроника. 2002. Вып.1. № 544. С. 167-172.
7. *Gribskii M.P., Akhramovich L.N., Grigor'ev E.V., Zuev S.A., Starostenko V.V., Churyumov G.I.* Influence of Pulse Electromagnetic Fields on Integrated Memory Chips // Telecommunications and Radio Engineering. 2007. V. 66. N 19. P. 1799 – 1804.
8. *Грибский М.П., Григорьев Е.В., Старостенко В.В., Унжаков Д.А.* Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП // Радиоэлектроника и информатика. 2007. Т. 39. № 4. С. 24 – 26.

9. *Старостенко В.В., Малишевский С.В., Таран Е.П., Чурюмов Г.И.* Поле в ближней зоне микросхемы при воздействии на нее электромагнитной волной в волноводе // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып.1. С. 62 – 68.
10. *Старостенко В.В., Таран Е.П., Малишевский С.В.* Использование «сенсорных датчиков» для численного решения задачи дифракции электромагнитных полей на металлодиэлектрических неоднородностях в волноводе // Вестник ХНУ. Радиофизика и электроника. 2002. Вып.1. № 544. С.167 - 172.
11. *Ye.P. Taran, V.V. Starostenko, Ye.V. Grigor`ev* Effect of Heterogeneity Parameters of Conducting Microstructures of Integrated Circuits on the Wunsch-Bell Curve // Telecommunications and Radio Engineering. 2002. 57 (8-9) P. 105-112.
12. *Старостенко В.В.* Дифракция электромагнитных волн на модели микросхемы в волноводе // Радиоэлектроника и информатика. 2002. Вып. 21. № 4. С. 33 – 36.
13. *Быков Ю.А., Карпунин С.Д., Газукина Е.И.* О некоторых особенностях структуры и свойств металлических "тонких" плёнок // МиТОМ. 2000. № 6. С. 45 - 47.
14. *Розенберг Г.В.* Оптика тонкослойных покрытий. М.: Физматгиз. 1958. С. 570.
15. *Вдовин В.А.* Нанометровые металлические пленки в датчиках мощных СВЧ импульсов // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», 26-30 октября 2009 г. ИРЭ РАН. С. 832 – 835.