**Проблематика внедрения диэлектриков с низкой диэлектрической проницаемостью в современные интегральные схемы**

***Цепкин М.В.***

*Студент*

*Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия*

*Акционерное общество «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники», Зеленоград, Россия*

*E-mail: tsepkin.mv@phystech.edu*

Диэлектрики используются в интегральных схемах (ИС) для разделения проводящих частей, таких как металлические межсоединения и транзисторные структуры, друг от друга. Однако по мере уменьшения размеров транзисторов и увеличения плотности их размещения диэлектрики истончились настолько, что накопление заряда, RC-задержки и перекрестные помехи стали негативно сказаться на работе финального устройства. Для решения этой проблемы были разработаны диэлектрики с низким коэффициентом диэлектрической проницаемости (low-k), которые заменили диоксид кремния (SiO2) в системе металлизации. Эти материалы уменьшают емкость, что позволяет повысить скорость переключения и снизить тепловыделение. Low-k диэлектрики – это класс материалов, которые позволяют улучшить производительность интегральных схем [1].

На сегодняшний день используется два подхода для уменьшения диэлектрической проницаемости: уменьшение силы диполя или количества диполей. Это означает использование материалов с химическими связями с меньшей поляризуемостью, чем Si-O, или материалов с меньшей плотностью. Эти два метода можно комбинировать для достижения еще более низких значений диэлектрической проницаемости. Индустрия производства ИС уже перешла на некоторые материалы с низкой диэлектрической проницаемостью, где некоторые кремниевые связи Si-O были заменены на менее полярные связи Si-F или Si-C. Более существенного снижения можно добиться, используя практически все неполярные связи, такие как C-C или C-H, например, в таких материалах, как органические полимеры. Кроме того, плотность материала может быть уменьшена путем увеличения свободного объема за счет перестройки структуры материала или введения пористости. Пористость может быть конститутивной или субтрактивной. Конститутивная пористость относится к самоорганизации материала. После изготовления такой материал становится пористым без какой-либо дополнительной обработки. Конститутивная пористость относительно низкая (обычно менее 15 %), а размеры пор составляют ~ 1 нм в диаметре [2].

Пористые low-k диэлектрики представляют собой проблему для интеграции из-за их низкой механической прочности, сложности интеграции с процессами травления и полировки [3]. Теплопроводность также сильно уменьшается с увеличением пористости. Следовательно, рассеивание тепла в металлических межсоединениях приводит к увеличению электромиграции меди (Cu). Эти материалы обладают более слабыми механическими свойствами по сравнению с их полностью плотными аналогами, что делает их более восприимчивыми к повреждениям в процессе производства, например, на этапе планаризации после напыления меди. Кроме того, пористая природа этих материалов может привести к проблемам на стадии формирования топографии и при травлении, что имеет решающее значение для их работы в интегральных схемах. В добавок, поскольку Cu-провод больше не удерживается в жестком диэлектрике, разрушение в результате выдавливание меди через окружающий диэлектрик становится более вероятным. Пористые материалы обладают также большей площадью поверхности, что в свою очередь повышает их требования к гидрофобности.

Данный литературный обзор призван дать широкий анализ преимуществ и проблем, основными из которых являются низкие механические характеристики, которые предотвращают дальнейшее снижение диэлектрической проницаемости, что в следствие может сделать резистивно-емкостную задержку основной причиной ограничения быстродействия интегральных схем.

**Литература**

1. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника: часть 2. Вопросы метода и классификации // Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника. 2017. № 4(168).
2. D Shamiryan; T Abell; F Iacopi; K Maex (2004). *Low-k dielectric materials. , 7(1), 34–39.*
3. A.Rezvanov et al. Materials Chemistry and Physics 290 (2022) 126571.