

УДК 539.23; 539.216.1

ВЛИЯНИЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЧИПОВ

Банников С.Д., студент гр. ЦСб-231, II курс
Тюрин М.И., студент группы ЦСб-231, II курс
Научный руководитель: Елкин И.С., к.т.н., доцент

Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово

Аннотация. Рассмотрено влияние наноструктурированных материалов на эффективность производства полупроводниковых чипов. Анализируются теоретические основы формирования их уникальных свойств, исследуются методы интеграции наноструктурированных материалов в технологические процессы и проанализированы практические результаты их применения. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых подходов к производству полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: наноструктурированные материалы, полупроводниковые чипы, нанотехнологии, энергоэффективность, надежность, процессор, микроэлектроника, технологические процессы.

Наноструктурированные материалы представляют собой вещества, структурные элементы которых имеют размеры от 1 до 100 нанометров. Их уникальные свойства обусловлены физическими и химическими свойствами на наномасштабном уровне, что связано с квантовыми размерными эффектами, увеличением удельной поверхности и высокой плотностью атомов на границах раздела. Например, такие материалы как графен, углеродные нанотрубки, нанопористые структуры и двумерные материалы (рис. 1) (например, дисульфид молибдена) обладают высокой химической активностью, механической прочностью, электрической проводимостью и теплопроводностью [1], [2].

Роль наноструктурированных материалов в производстве полупроводниковых чипов заключается в их способности решать критически важные проблемы современных технологий, такие как миниатюризация компонентов, улучшение теплового управления и повышение эффективности работы устройств. Современная микроэлектроника движется в направлении увеличения плотности транзисторов на единицу площади или на единицу объема полупроводникового чипа, что требует использования материалов с

уникальными электрическими и тепловыми характеристиками. Например, графен и углеродные нанотрубки активно исследуются как материалы для улучшения электропроводящих слоёв и интерконнектов. Их высокая теплопроводность помогает эффективно отводить тепло от зон интенсивной работы транзисторов, снижая риск перегрева и отказа системы [2], [4].



*Рис. 1. Типы наноструктурированных материалов по размерности:
0D – нульмерные, 1D – одномерные, 2D – двумерные, 3D – трёхмерные*

Одной из ключевых проблем полупроводниковой промышленности является контроль структуры и размеров материалов. Производство наноматериалов с высокой степенью однородности на больших площадях остаётся сложной задачей. Например, для графена требуется разработка технологий получения однослойного материала без дефектов и примесей на субстрате значительных размеров.

Другой вызов заключается в интеграции наноструктурированных материалов в существующие технологические процессы. Многие из них несовместимы с традиционными методами фотолитографии, что требует адаптации или создания новых производственных линий. Этот процесс связан с высокими затратами, что ограничивает коммерческое внедрение таких технологий.

Технологический процесс – это набор операций и технологий, используемых для производства микроскопических объектов и компонентов на уровне нанометров.

Тепловая стабильность наноматериалов является ещё одной критической проблемой. Многие наноструктуры теряют свои уникальные свойства при высоких температурах, которые неизбежны в процессе работы современных чипов. Это требует создания более термостойких материалов или разработки специальных методов охлаждения [3].

По результатам исследований можно сказать, что использование наноструктурированных материалов в производстве транзисторов значительно улучшает их характеристики и открывает новые возможности для повышения производительности и энергоэффективности полупроводниковых устройств. Одним из факторов, повлиявших на улучшение характеристик транзисторов, стало внедрение High-k диэлектрических материалов, таких как HfO_2 и ZrO_2 [6].

Эти материалы позволяют значительно увеличить ёмкость затвора транзистора на 30-50% по сравнению с традиционными материалами, такими как SiO_2 , при этом значительно снижая токи утечки на 60% [4]. Это улучшение особенно важно для повышения общей производительности транзисторов и минимизации потерь энергии, что является критическим для современных технологий, требующих высокоэффективных компонентов.

Кроме того, использование наноматериалов, таких как графен и углеродные нанотрубки, также привело к значительному улучшению характеристик транзисторов. Графен и углеродные нанотрубки имеют подвижность носителей заряда до $200\,000\text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что существенно превосходит показатели традиционного кремния, используемого в большинстве современных транзисторов. Высокая подвижность носителей заряда напрямую влияет на улучшение скорости работы транзисторов, что позволяет создавать более быстрые и мощные вычислительные устройства. Эти материалы также обладают исключительными теплопроводными свойствами — до $5000\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, что способствует эффективному отводу тепла от работающих компонентов [4]. Эффективное управление тепловыми потоками является важным фактором для повышения надежности и долговечности транзисторов, а также для предотвращения перегрева компонентов, что может значительно улучшить работу устройств в целом.

Еще одним важным фактором стало внедрение архитектуры FinFET, которая в сочетании с наноматериалами позволила значительно снизить энергопотребление при сохранении высокой производительности. Снижение энергозатрат на 30% при тех же показателях производительности стало возможным благодаря уменьшению эффектов короткого канала и улучшению управляемости каналом транзистора. Эта архитектура обеспечивает лучшие характеристики по сравнению с традиционными кремниевыми транзисторами, что позволяет создавать более компактные и энергоэффективные устройства [5].

При сравнении наноматериалов с традиционными материалами, такими как кремний, становится очевидным их явное преимущество в нескольких ключевых областях. Внедрение наноматериалов позволяет значительно уменьшить размеры устройств, что в свою очередь способствует их миниатюризации и повышению плотности интеграции. Это открывает новые

перспективы для создания более компактных и мощных микросхем и электронных устройств. Также, наноматериалы обеспечивают улучшенное тепловое управление и значительно повышают эффективность работы транзисторов, что в свою очередь сказывается на общей производительности и надежности конечных устройств (рис. 2) снижении токов утечки, улучшении тепловыделения и повышении плотности тока.

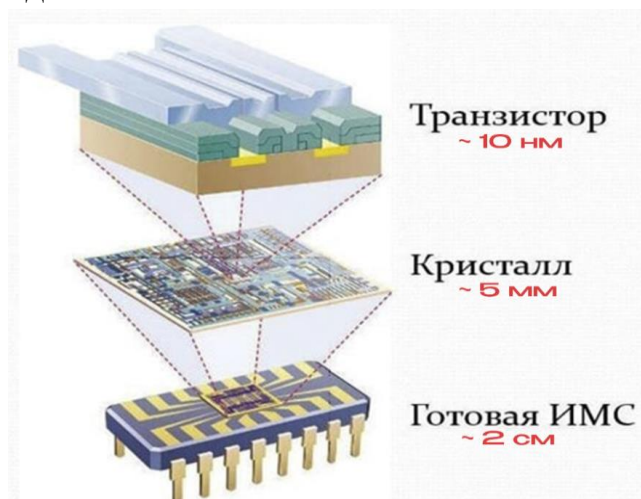


Рис. 2. Схема современного микрочипа

Таблица 1

Характеристики и результаты применения наноструктурированных материалов в транзисторах

Материал	Уникальные свойства	Методы анализа	Основные результаты
Графен	Высокая подвижность носителей (до 200 000 см ² /В·с), высокая теплопроводность (до 5000 Вт/м·К)	ТЕМ, Raman, электрические измерения	Увеличение скорости работы, эффективный отвод тепла
Углеродные нанотрубки	Высокая механическая прочность, высокая подвижность носителей заряда	SEM, ТЕМ, электрические измерения	Повышение плотности тока, снижение токов утечки
HfO ₂ , ZrO ₂	Высокая диэлектрическая проницаемость	XRD, эллипсометрия, электрические измерения	Увеличение ёмкости затвора на 30-50%, снижение токов утечки на 60%
SiO ₂ (традиционный)	Низкая диэлектрическая проницаемость	XRD, электрические измерения	Ограничение плотности интеграции, более высокие токи утечки

Архитектура FinFET	Улучшенное управление каналом транзистора	Электрические измерения, тепловой анализ	Снижение энергопотребления на 30%, уменьшение эффектов короткого канала
--------------------	---	--	---

Опираясь на проанализированные данные, можно сказать, что внедрение наноструктурированных материалов в производство транзисторов имеет значительный потенциал для создания устройств нового поколения (табл. 1). Они позволяют значительно улучшить ключевые характеристики, такие как скорость работы, энергоэффективность и тепловое управление, что открывает широкие перспективы для дальнейшего развития полупроводниковой промышленности и создания более совершенных электронных устройств.

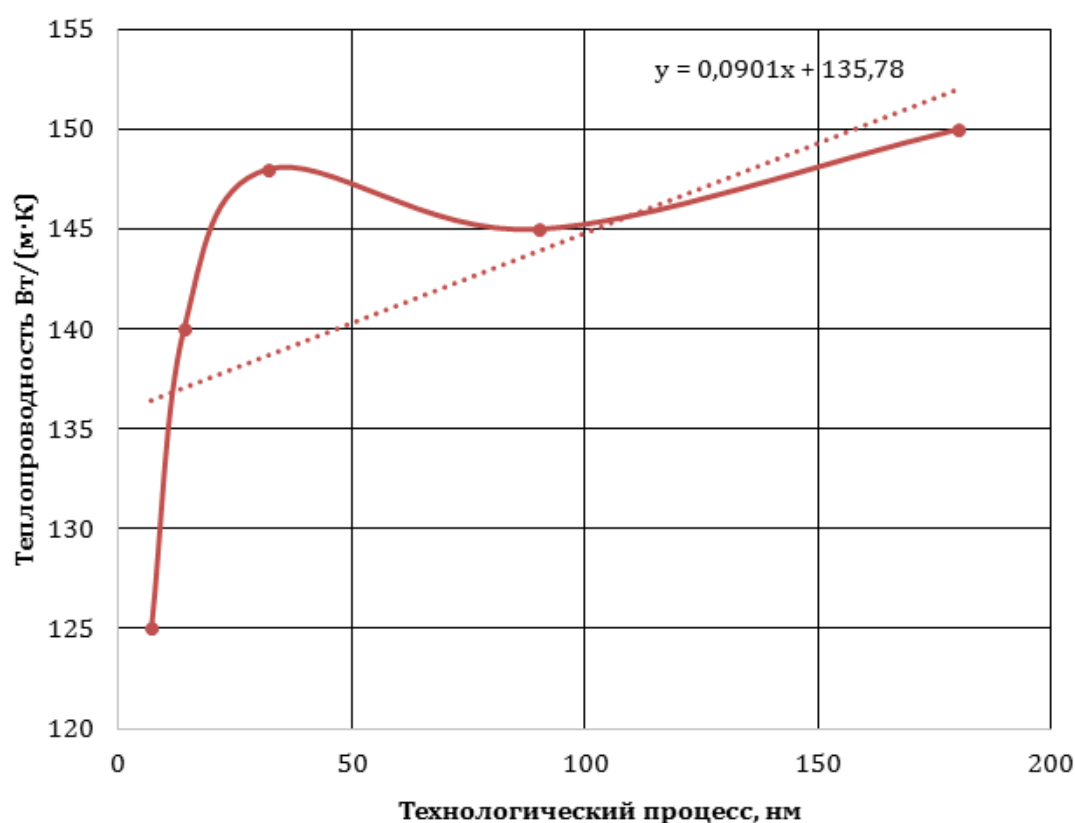


Рис. 3. Зависимость теплопроводности кремния от размера техпроцесса

Несмотря на выдающиеся свойства наноматериалов, их массовое внедрение сталкивается с серьёзными вызовами. Например, производство графена требует сложных и дорогостоящих технологий, таких как химическое осаждение или механическое разделение слоев. Нитриды галлия (GaN), несмотря на их высокую теплопроводность и устойчивость к температурам, также остаются дорогими и трудными для интеграции в существующие технологические процессы [6]. Проблемы масштабируемости,

высокая стоимость сырья и несовместимость с традиционными подложками являются основными барьерами [1].

Проведенные исследования показали, что использование наноматериалов позволяет существенно повысить производительность и энергоэффективность чипов, однако также выявлены ограничения, связанные с технологической совместимостью и экономической целесообразностью. Наноструктурированные материалы представляют собой ключ к развитию высокотехнологичных полупроводниковых устройств. Их использование позволяет достичь высокой миниатюризации, улучшить тепловое управление и повысить энергоэффективность. Несмотря на существующие проблемы — высокую стоимость и сложности интеграции — перспективы их внедрения в полупроводниковую промышленность крайне положительны [1], [6].

Развитие методов синтеза и обработки наноматериалов позволит преодолеть текущие ограничения, что создаст основу для новых, более мощных и энергоэффективных технологий, способных существенно улучшить качество жизни и производительность в различных отраслях.

Список литературы:

1. Ханин С. Д., Кумзеров Ю. А. Физика и технология наноструктурированных функциональных материалов. — Санкт-Петербург: Издательство Военной академии связи Санкт-Петербург, 2018. — 392 с.
2. Е. И. Пряхин, С. А. Вологжанина, А. П. Петкова, О. Ю. Ганзуленко Наноматериалы и нанотехнологии. — 2-е изд. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 368 с.
3. Раздел исследований в области наноматериалов. // Московский физико-технический институт (МФТИ). URL: <https://mipt.ru>.
4. Бадаев А. С. "Материалы и структуры микро- и наноэлектроники. Часть 1. Проводниковые материалы". — Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2015. — 156 с.
5. Киреев В. Ю. Введение в технологии микроэлектроники и проводимостью и нанотехнологии. — Москва: ФГУП "ЦНИИХМ", 2008. — 432 с.
6. Функциональные и конструкционные наноматериалы: учебно-методическое пособие. — Екатеринбург: Издательство Уральского федерального университета, 2018. — 131 с.