

ЛЕКЦИЯ 12. ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ.

А. Классификация лазерных технологических процессов в микроэлектронике

В настоящее время микроэлектроника освоила размеры ИС 90 нм и степень интеграции до 10^7 активных элементов на кристалле. Однако потребности вычислительной техники и автоматики таковы, что для их удовлетворения необходимо освоение размеров 32 нм и в перспективе 13 нм и повышение степени интеграции в 10 раз. При этом движение электронов определяется не классическими, а квантовыми эффектами, включая размерное квантование. Тенденция развития микроэлектроники в направлении повышения степени интеграции, по всей видимости, сохранится и в будущем. Обеспечение такой тенденции за счет уменьшения размеров элементов практически будет исчерпано. Остаются два пути: развитие суб-систем по всей пластине и трехмерные ИС. Возможно появление и принципиально новых решений, например в молекулярной электронике, что, правда, пока оценивается весьма проблематично. Вероятность выхода годных ИС можно оценить по формуле

$$W = \exp(-D \cdot N \cdot S/l^2), \quad (5.1)$$

где D – плотность дефектов, приводящих к отказу; N – число критических операций; S – площадь кристалла; l – минимальный размер элементов микросхемы. Из формулы следует, что с ростом площади кристалла и уменьшением критических размеров необходимо уменьшать число технологических операций и плотность дефектов. Это особенно актуально для технологии трехмерных ИС. В субмикронной технологии возрастают требования к точности и воспроизводимости технологического режима, незначительные отклонения от которого при поточно-групповом методе организации технологии будут приводить к большим материальным и экономическим потерям из-за отказа ИС. Следовательно, необходим переход к индивидуальной обработке пластин с автоматическим контролем технологических операций. Уникальная возможность освоения полностью автоматизированной низкотемпературной технологии ИС с субмикронным разрешением при сокращении числа критических операций и контроле параметров процессов в реальном масштабе времени открывается при использовании лазерного луча в качестве технологического инструмента.

Классификация лазерных технологических процессов в электронной промышленности.

Условно все технологические процессы в лазерной технологии полупроводников можно разделить на четыре уровня, первые три из которых описывают технологию изготовления микросхем, а 4-й – технологию создания электронных приборов с использованием микросхем: 1.- уровень подготовительных операций: очистка поверхности, геттерирование, улучшение свойств структуры, изготовление фотошаблонов ИС, нанесение рисунка. 2. - уровень основных операций: импульсный лазерный отжиг (ИЛО) после ионной имплантации, лазерное легирование, окисление, получение силицидов, травление, осаждение тонких пленок. 3.- уровень завершающих операций: подгонка, формирование омических контактов, маркировка, приваривание электрических выводов, сварка корпусов ИС. 4. - подготовка и сборка печатных плат: изготовление фотошаблонов печатных плат, нанесение рисунка печатных плат, сверление печатных плат, пайка печатных узлов, лазерный контроль качества паяных соединений. В каждом из выделенных уровней коротко остановимся на процессах, основанных на глубоком знании физических моделей.

В указанных процессах облучение поверхности полупроводника может быть как равномерным по площади пластины, так и локальным и проводиться в активной среде по заданной программе, что освобождает от использования традиционной резисторной литографии и позволяет существенно сократить число критических технологических операций и уменьшить трудоемкость технологии в целом.

В. Подготовительные операции.

1. Очистка поверхности

Для получения чистой и совершенной поверхности уникальные возможности представляет импульсное лазерное облучение, которое обеспечивает стерильность процесса очистки и получения совершенной кристаллической структуры активного поверхностного слоя. Исследования очистки кремния, арсенида галлия и других полупроводников, проводившиеся путем облучения импульсами рубинового лазера в сверхвысоком вакууме, показали, что такой метод получения чистой поверхности не сопровождается

отрицательными эффектами, которые свойственны известным способам и, кроме того, прост в технической реализации. Обсудим некоторые результаты лазерной очистки поверхности монокристаллов кремния и арсенида галлия с использованием длины волны излучения 1,06 мкм. Предварительная подготовка пластин включала обычные операции для этих материалов - травление, отмывку, сушку. Эксперименты проводились в камере оже-спектрометра при остаточном давлении не хуже $4 \cdot 10^{-7}$ Па. Лазерный пучок фокусировали на поверхности образца в пятна диаметром 1–2 мм при изменении плотности энергии в диапазоне 0.5–3 Дж/см². Длительность импульса составляла 15 нс. Лазерный луч сканировали по поверхности полупроводниковой пластины с помощью оптико-механического устройства. Об изменении элементного состава поверхности свидетельствовало изменение амплитуды оже-пигов кислорода (509 эВ), углерода (272 эВ) и элемента подложки на спектрах с поверхности кремния и арсенида галлия и их отношения к амплитудам пиков основного материала образцов - кремния (92 эВ) и мышьяка (31 эВ).

Зависимость отношений амплитуд пиков C (272 эВ)/Si (92 эВ) и O (509 эВ) / Si (92 эВ) на оже-спектрах, наблюдаемых в процессе облучения кремниевой поверхности лазерным пучком с плотностью энергии 2 Дж/см² от числа световых импульсов n_i , представлена на рис.1,а. Аналогичные результаты наблюдали и при обработке поверхности кристаллов арсенида галлия импульсами с плотностью энергии 1 Дж/см² (рис.1,б).

Видно, что обработка образцов несколькими лазерными импульсами ($n_i \sim 10$) приводит к снижению концентраций углерода и кислорода на поверхности кремния соответственно в 15 и 9 раз. При проведении лазерной очистки поверхности арсенида галлия при пятикратном облучении с плотностью энергии 1 Дж/см² поверхностная концентрация углерода и кислорода снизилась соответственно в 19 и 17 раз. Стимулировать дальнейшую десорбцию удалось путем повышения энергии импульсов лазерного излучения, однако такое повышение ограничивалось разрушением поверхности полупроводниковой пластины вследствие сильного разогрева в отдельных точках светового пятна. Оказалось, что существенно осложняет очистку поверхности неоднородность распределения плотности энергии по сечению пучка используемого лазера. На рис. 2 представлена зависимость отношения амплитуды оже-пигов кислорода и углерода поверхности (100) образцов кремния к амплитуде пика кремния от плотности энергии в

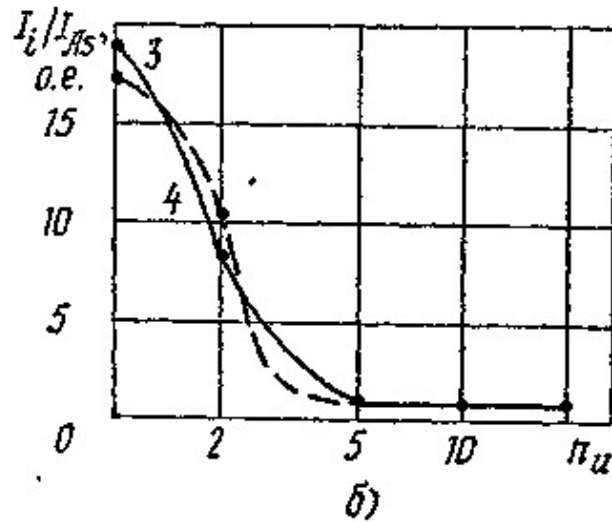
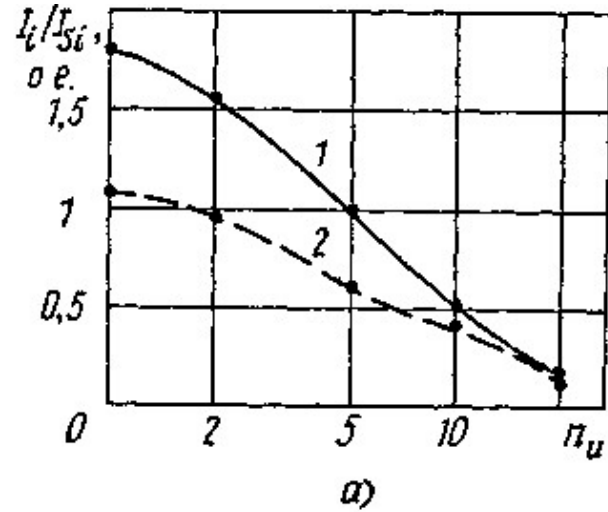


Рис. 1: Зависимость отношений амплитуд пиков C (272 эВ)/Si (92 эВ) и O (509 эВ) / Si (92 эВ) на оже-спектрах, наблюдаемых в процессе облучения кремниевой поверхности лазерным пучком с плотностью энергии 2 Дж/см² от числа световых импульсов n_u .

лазерном пучке при облучении 15 импульсами.

По характеру этой зависимости можно судить, что лазерно-стимулированная десорбция углерода и кислорода с поверхности кремния имеет пороговый характер и начинается при 1 Дж/см². Эффективность очистки постепенно возрастает по мере увеличения плотности энергии в импульсах и ограничивается разрушением поверхности кристалла при средней удельной энергии пучка, превышающей 2.3 Дж/см² для данного распределения ее по сечению. Дальнейшего повышения эффективности очистки можно достичь

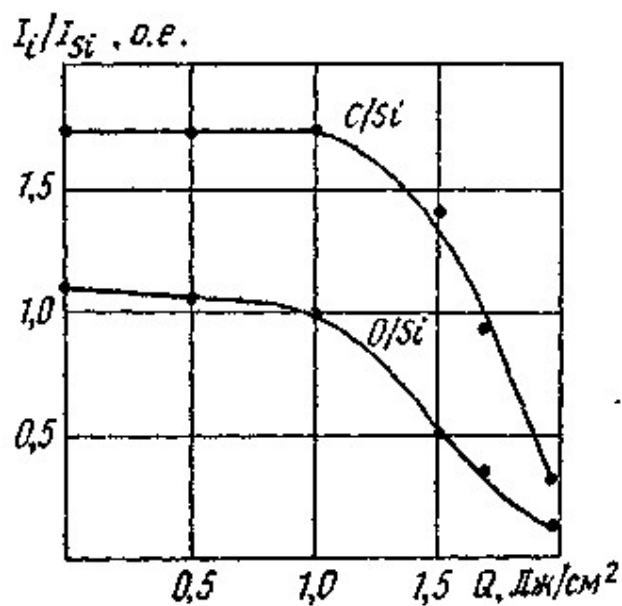


Рис. 2: Зависимость отношения амплитуды оже-пиков кислорода и углерода поверхности (100) образцов кремния к амплитуде пика кремния от плотности энергии.

путем использования специальных способов выравнивания плотности энергии по сечению лазерного пучка, а также применением активных элементов с пятном большого диаметра (40-50 мм).

Интересно отметить, что использование лазерного излучения в режиме свободной генерации ($\tau_i = 1$ мс, $Q = 10 \div 20$ Дж/см², диаметр пучка 30 мм) приводило лишь к незначительному снижению содержания кислорода и углерода (не более чем в 1,5 раза). Для непрерывного контроля процессов лазерной очистки полупроводниковых пластин удобно использовать быстродействующие динамические квадрупольные масс-спектрометры, которые хорошо вписываются в технологические процессы полупроводниковой микро-электроники. Результаты, полученные при лазерной очистке поверхности полупроводниковых пластин наносекундными импульсами, сравнимы с результатами неоднократной очистки тлеющим разрядом при обычном термическом отжиге в течение нескольких дней. Концентрация кислорода и углерода после обработки была менее 0.1 % монослоя. Важным вопросом является вопрос о том, куда деваются с поверхности атомы в результате лазерного облучения. Заметное повышение давления в камере обработки, которое наблюдается при первом лазерном импульсе, свидетельствует о десорбции загрязнений с поверхности при облучении. С другой стороны,

при плавлении поверхностного слоя облучаемого материала, примеси, первоначально находящиеся на поверхности, могут интенсивно перераспределяться в образующемся расплаве.

Концентрация кислорода на поверхности и в приповерхностном слое до и после импульсного лазерного воздействия была исследована методами обратного резерфордского рассеяния и ядерного резонанса по реакции $^{16}\text{O}(\alpha\alpha)^{18}\text{O}$ в комплексе с оже-спектроскопией. После облучения покрытой естественным адсорбированным кислородом поверхности (100) кремния восемью импульсами с плотностью энергии $Q \sim 1.55$ Дж/см² в сверхвысокой вакууме концентрация кислорода на поверхности составила менее 0,3 % монослоя (по данным оже-спектроскопии). Концентрация атомов кислорода на средней глубине 1100 Å для интервала глубин 500–1700 Å составляла, по данным анализа ядерной реакции, менее $3.1 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Это указывает на то, что при лазерном облучении менее 1 % кислорода диффундирует в объем, так что концентрация в объеме была существенно ниже, чем предельная растворимость кислорода в кремнии. Этот факт можно объяснить следующим образом.

Известно, что скорость растворения окисла в кремнии составляет величину $\sim 10^5$ см/мин. Толщина естественного окисла в сверхвысоком вакууме равна ~ 20 Å. Это означает, что для внедрения такого слоя в зону проплавления требуется около время ~ 1 с. Поскольку время существования расплава значительно меньше ($\sim 10^{-6}$ с), в расплав успевает внедриться лишь малая часть атомов кислорода. Чтобы свести к минимуму возможность перераспределения таких загрязнений, как кислород и углерод, наиболее эффективно вначале произвести катодное распыление поверхности и уже затем лазерным облучением получить атомарно-чистую поверхностную зону.

2. Геттерирование

Эффективным способом устранения вредного влияния фоновых примесей в объеме полупроводникового материала является создание различного рода стоков для точечных дефектов (собственных и примесных), которые оттягивали бы их на себя. Эти способы называют геттерированием, а сами стоки - геттерами (“поглотителями”). При всем разнообразии способов геттерирования в основе своей они имеют создание условий для направленной диффузии неконтролируемых примесей к геттерам, играющим

роль стоков. Одной из причин такой направленной диффузии может быть наличие поля упругих напряжений (в макро- или микро-объемах). Геттеры можно создавать как на рабочей, так и на нерабочей поверхности полупроводниковой пластины, а также вводить их в объем подложки. В одном случае геттерирующий поверхностный слой образуют созданием в нем стоков в виде дислокаций и микро- трещин, в другом– геттеры создаются в глубине от рабочей поверхности подложки. Для кремния эффективную роль такого геттера в глубине могут играть выделения кислородсодержащих фаз (преципитатов) и дефекты упаковки. В настоящее время широко исследуется возможность применения лазерного излучения для создания областей, генерирующих точечные дефекты. В США запатентован метод генерирования быстро-диффундирующих примесей, в котором для создания нарушенного слоя используется излучение лазера, работающего в импульсном режиме. Сфокусированный луч лазера сканируется по нерабочей стороне пластины, образуя ряды мелких (глубиной 5–15 мкм) лунок диаметром 45–60 мкм с измененной морфологией поверхности, что обусловлено частичным плавлением полупроводникового материала и его кристаллизацией в неравновесных условиях. Степень нарушения кристаллической структуры полупроводника регулируется путем изменения размеров лунок и степени их перекрытия. Последующая термообработка при температуре 973–1523 К приводит к формированию сетки дислокаций, декорированных диффундирующими примесями. Для обработки кремниевых пластин диаметром 76 мм и толщиной 0.5 мм излучением АИГ: Nd- лазера с выходной мощностью 8 Вт, работающего в режиме модуляции добротности, используют три типа облучения (см. Таблицу I:

Таблица I:

	I	II	III
Частота следования импульсов, кГц	10	20	30
Диаметр светового пятна, мкм	60	45	45
Степень перекрытия пятен, %	0	30	70
Нарушение поверхности	Слабое	Умеренное	Сильное
Глубина распространения дислокаций, мкм	10	50	250
Плотность дислокаций, мм ⁻¹	75	300	более 10 ³

Известен метод геттерирования тяжелых металлов, в котором геттерирующий слой глубиной 0.5–10 мкм, состоящий из сетки дислокаций, формируется вдвоенными импульсами рубинового лазера при плотности энергии излучения 1–10 Дж/см² и длительности импульсов 10–50 нс. Детальное исследование процесса лазерной обработки Si-пластин проведено с использованием излучения АИГ: Nd-лазера с длиной волны 1.06 мкм. Луч, сфокусированный в пятно диаметром 40–115 мкм, сканировался по поверхности нерабочей стороны пластины со скоростью ~ 0.2 м/с. Расстояние между строк варьировали в пределах от 0.5 до 5 мм. После лазерной обработки пластину окисляли, формировали МОП-конденсаторы на рабочей ее стороне для измерения времени жизни неосновных носителей и исследовали с помощью рентгеновской топографии, просвечивающей электронной микроскопии и селективного травления. Установлено, что при плотности энергии облучения менее 7 Дж/см² происходит только плавление локальных областей кремния с последующей эпитаксиальной рекристаллизацией. При этом плотность дефектов в нарушенном слое мала, и эффект геттерирования отсутствует. При плотности энергии более 7 Дж/см² помимо плавления начинается испарение кремния, центральная зона приобретает кристаллическую структуру, а на периферии оплавленной области образуются дислокации и дефекты упаковки, обусловленные неоднородным нагревом подложки. При плотностях энергии менее 10 Дж/см² образуются малые термически нестабильные дислокации и лишь при плотностях более 15 Дж/см² формируются стабильные веерообразные дислокационные линии и кластеры. Увеличение энергии облучения до 30 Дж/см² и, соответственно, глубины нарушенного слоя до 20 мкм приводило к прорастанию дислокаций по рабочей стороне пластины и к существенному снижению времени жизни неосновных носителей. Лазерная обработка при оптимальной плотности энергии, которая по разным оценкам составляет 10–20 Дж/см², с глубиной нарушенного слоя 5–10 мкм и расстоянием между строками 0.5–1 мм обеспечивала значительное увеличение времени жизни неосновных носителей, которое сохранялось при многократном окислении. Плотность ямок травления на планарной стороне кремниевых пластин, прошедших лазерную обработку с последующим отжигом, снижалась с 10^6 см⁻² практически до нуля, а выход годных тестовых многоэмиттерных транзисторов увеличивался с 33 до 57 %.

Геттерирование быстро диффундирующих примесей может происходить и при значительно меньших плотностях энергии облучения. Так, при обработке поверхности крем-

ния на воздухе излучением лазера с плотностью энергии 1.7–1.9 Дж/см² обнаружены значительные количества α -SiO₂, образовавшейся на глубине, соответствующей толщине слоя, расплавленного излучением. Экспериментально установлено, что при последующей термообработке 973–1073 К области выпадения α -SiO₂ декорируются примесями металлов, в частности медью.

Лазерные методы геттерирования использовали и в других технологических операциях. Так, лазерную обработку дополняли термообработкой пластин в хлоросодержащей атмосфере. Известно, что “хлорное” окисление позволяет геттерировать щелочные и переходные металлы, однако золото и металлы платиновой группы не геттерируются с его помощью из-за нестабильности их хлоридов при высоких температурах. Применение лазерного геттерирования в комбинации с хлорным окислением позволило снизить уровень загрязнения кремния золотом до концентрации 10⁻⁵ % ат. и в 1.5–3 раза повысить выход годных БИС.

Необходимо также отметить, что генерация дефектов, вызванная лазерным облучением полупроводников, существенным образом влияет на электрофизические свойства обработанных слоев. В частности, наблюдалась даже инверсия типа проводимости облученного полупроводника.

С. Основные операции.

1. Окисление

Чаще всего в полупроводниковой электронике в качестве диэлектрических пленок используется диоксид кремния – SiO₂ и нитрид кремния Si₃N₄. Наиболее важным положительным свойством перечисленных диэлектрических пленок является их термическая стабильность. В настоящее время термическое окисление является основным методом получения аморфных слоев α -SiO₂ на кремнии. Высокая однородность пленок, малая плотность зарядов на границе Si/ α -SiO₂, минимальная опасность трещинообразования составляют преимущества этого способа. К его недостаткам относятся высокая температура процесса, потери кремния, снижение точности воспроизводства топологической структуры схемы при многократном повторении процесса. Кроме того, метод термического окисления не- пригоден для других полупроводниковых материа-

лов. Высокотемпературное окисление вызывает напряжения, дефекты упаковки и перераспределение примесей в используемых материалах, что ведет к деградации рабочих характеристик выходных устройств.

Специалистами фирмы IBM проведен эксперимент по получению пленок SiO_2 из окиси кремния SiO при помощи лазерного облучения при комнатной температуре. Использовался лазер фирмы Lambda - Physics EMC-500 на ArF ($\lambda = 193$ нм, $\tau_i = 15$ нс, частота следования импульсов 1–5 Гц), обеспечивающий плотность энергии излучения от 40 до 110 мДж/см². Облучение пленок SiO толщиной 1000–5000 Å осуществлялось через прямоугольную маску ($0.8 \times 1,5$ см), в результате чего формировались пленки SiO_2 .

Существует другой способ окисления, заключающийся в имплантации атомов кислорода в кремний и последующей реакции окисления при отжиге, однако температура отжига такая же высокая, как и при обычном термическом окислении. Была исследована возможность использования импульсного лазерного отжига имплантированного кислородом кремния для формирования оксидных слоев SiO_2 . Основные преимущества этого способа – отжиг без значительного нагревания подложки и чрезвычайная быстрота. Образцы кремния p -типа (100) при температуре жидкого азота имплантировались ионами O^+ с энергией 50 кэВ. В результате максимальная концентрация внедренных атомов составляла $\sim 10^{22}$ см⁻³ на глубине 0.1 мкм. Лазерный отжиг проводили импульсами АИГ: Nd - лазера ($\tau_i = 70$ нс, $\lambda = 1.06$ мкм, диаметр пятна излучения 3 мм). Плотность энергии излучения составляла 2–2.5 Дж/см². В результате были получены пленки SiO_2 хорошего качества.

К преимуществам лазерного окисления (получения слоев SiO и SiO_2) можно отнести локальность процесса и значительное увеличение скорости окисления. В целом, можно считать, что наиболее актуальная задача формирования границы раздела “диэлектрик - полупроводник” между функциональными слоями СБИС в случае кремния принципиально решена при использовании в качестве диэлектрика двуокиси кремния SiO_2 . Совершенно иная ситуация наблюдается для полупроводников группы A_3B_5 . При использовании традиционных диэлектриков, таких, как SiO_2 , Si_3N_4 , SiON , Al_2O_3 получение воспроизводимых и качественных МДП-структур невозможно. Эта задача была решена с помощью лазерных методов. Так, на поверхности GaAs n -типа при облучении непрерывным АИГ: Nd -лазером в атмосфере кислорода получен собственный

оксид Ga_2O_3 . Совершенные методы исследования показали, что при изменении характерных времен нагрева и остывания удается регулировать и воспроизводить толщину слоя Ga_2O_3 на поверхности GaAs . Для изготовления аналогов МДП-структур на основе геттеропереходов весьма эффективным оказывается метод лазерного осаждения из твердой мишени соединений A_2B_6 на поверхность A_3B_5 , если АИГ: Nd-лазер работает в режиме свободной генерации. Этим альтернативным методом при температуре подложки 360°C получены структуры InSb-CdTe с минимальной плотностью поверхностных состояний ниже $6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$, с малым встроенным зарядом и безгистерезисными вольт-фарадными характеристиками.