

КАЧЕСТВО ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УДК 669.782:620.179:621.378.325

В. А. Анякин, С. А. Кутолин, В. М. Раецкий

МЕТОД КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ
С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматриваются особенности распределения примесей, вводимых по глубине легированного слоя, возможность управления концентрацией примеси, влияние характеристик когерентного излучения на воспроизводимость параметров сложных структур; высказываются соображения относительно механизма процесса легирования. Лазерным легированием изготовлены диодные матрицы. Диоды имеют ток утечки 10 μ ка при обратном напряжении 80 в.

Известно применение лазерного излучения в микроэлектронике для приварки вводов дискретных приборов и интегральных схем, подгонки номиналов резисторов, изготовления прецизионных фотошаблонов [1].

Недавно появились сообщения об успешном применении этого излучения для изготовления кремниевых диодов [2, 3]. Определенным преимуществом этого метода является возможность локализации энергии на малой площади и легирования по заданному рисунку, минуя процесс фотолитографии. Однако метод лазерного легирования практически не изучен и пока еще трудно определить его место в арсенале технологических средств микроэлектроники.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве источника излучения использовался ОКГ на рубине с энергией ≈ 1 Дж. Регулировка энергии на выходе системы осуществлялась ступенчатым образом с помощью системы поглощающих светофильтров. Использовался пассивный затвор из фталоцианина ванадия, что позволяло помимо режима свободной генерации с длительностью импульса $\sim 10^{-3}$ сек реализовать режим с модуляцией добротности резонатора при сокращении длительности импульса до $\sim 10^{-8}$ сек. Частота следования импульсов обычно не превышала 5 выстрелов в минуту. Схема установки дана на рис. 1.

В качестве мишени использовался монокристаллический кремний как электронной, так и дырочной проводимости. Характер проводимости в области облучения определялся с помощью термозонда, а также по результатам холловских измерений при определении подвижности носителей. Для построения концентрационных профилей использовались

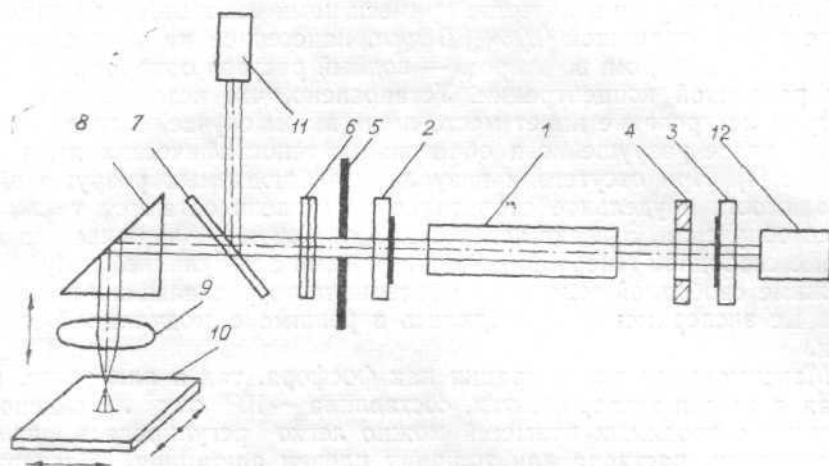


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — рубиновый стержень; 2 — переднее зеркало; 3 — заднее зеркало; 4 — пассивный затвор; 5 — маска; 6 — ослабитель; 7 — плоскопараллельная стеклянная пластинка; 8 — поворотная призма; 9 — фокусирующая линза; 10 — предметный столик; 11 — колориметр; 12 — световой визир

результаты измерения поверхностного сопротивления стандартным четырехзондовым методом при послойном травлении образцов и измеренные значения холловской подвижности. Снимались электронограммы облученных образцов и осуществлялся подсчет дислокаций по ямкам травления. Вольт-амперные характеристики диодных структур, полученных с помощью лазерного легирования, изучались с помощью характериографа ПНХТ-1. Для удобства измерений использовались образцы кремния размерами $8 \times 8 \times 0,4$ мм³. Одна из больших граней такого образца полностью засвечивалась и на ней проводились соответствующие измерения. Диаметр светового луча в плоскости мишени составлял 2 мм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Подготовленный образец подвергался локальному воздействию лазерного излучения. В месте взаимодействия излучения с веществом в результате термических и газодинамических процессов возникает слой основного вещества, насыщенный легирующей примесью.

В зависимости от типа проводимости основы и характера лигатуры можно получить слой $p^+ - p$; $n^+ - n$; $p^+ - n$; $n^+ - p$ -типов. Характерно, что эффективность процесса не зависит от того, в какой фазе находится легирующий элемент, — он может находиться в твердой фазе в виде пленки металла (или сплава), нанесенной на поверхность образца, или в жидкой фазе, например в виде раствора, прозрачного для излучения.

Вид лигатуры определяет лишь особенности подготовки образца и степень сложности применяемого технологического оборудования. Так, в случае твердофазной лигатуры необходимо предварительное нанесение ее на поверхность пластины. Если же легирующая примесь находится в жидкой фазе, то образец погружается непосредственно в жидкость и подвергается облучению через слой жидкости.

В первом случае в качестве примеси нами использовался алюминий в виде пленки толщиной $0,03 \pm 1,0$ мкм, нанесенной на образец вакуум-термическим методом, во втором — водный раствор ортофосфорной кислоты различной концентрации. Установлено, что независимо от фазы лигатуры легирование имеет место лишь в том случае, если происходит поверхностное разрушение и образование топографических дефектов в кремнии [4]. При отсутствии визуально наблюдаемых разрушений тип проводимости и удельное сопротивление мишени остаются такими же, как до облучения. Эффект легирования при этом обнаруживается как в режиме свободной генерации, так и в режиме с модуляцией добротности. В режиме свободной генерации образцы часто раскалываются, поэтому основные эксперименты проводились в режиме с модуляцией добротности.

Максимальная концентрация как фосфора, так и алюминия, полученная в наших экспериментах, составляла $\sim 10^{20}$ см⁻³. Найдено, что содержание вводимых примесей можно легко регулировать, изменяя концентрацию раствора или толщину пленки алюминия. Экспериментально найденная для обоих случаев зависимость оказывается линейной (рис. 2). Прямая 1 отражает связь между концентрациями фосфора в легированном слое и кислоты в растворе, а прямая 2 характеризует связь между концентрацией алюминия в слое и толщиной исходной пленки алюминия (на рисунке вместо толщины отложено эквивалентное ей число атомов алюминия на 1 см² пленки).

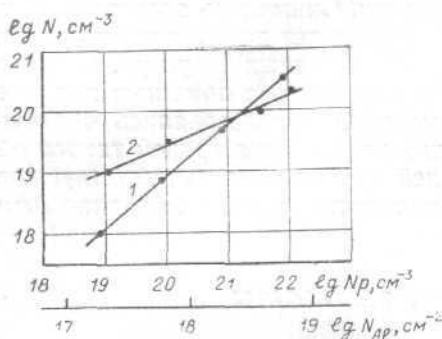


Рис. 2. Зависимость концентрации фосфора и алюминия в легированном слое от содержания этих элементов в лигатуре:

1 — фосфор, основа — кремний КДБ-4,5; 2 — алюминий, основа — кремний КЭФ-4,5

Типичное распределение примесей по толщине слоя для обоих случаев показано на рис. 3. Концентрация как в том, так и в другом случае относительно слабо меняется по толщине слоя и распределение близко к прямоугольному. Зависимость емкости перехода от обратного напряжения также соответствует «резкому» переходу (рис. 4). Толщина легированного слоя неодинакова в различных участках образца и колеблется от 0,6 до 0,8 мкм, что является, по всей видимости, следствием неравномерности распределения интенсивности излучения по сечению луча, характерной для рубинового лазера.

Электроннографические исследования и подсчет плотности дислокаций по ямкам травления показали, что лазерное легирование не приводит к нарушению монокристалличности образца и не сопровождается ростом числа дислокаций. Найденные из холловских измерений значения подвижности носителей находятся в соответствии с концентрацией вво-

димых примесей и для случая максимальной в наших экспериментах концентрации $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ составляют $25 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ и $44 \text{ см}^2/\text{в} \cdot \text{сек}$ для дырок и электронов соответственно.

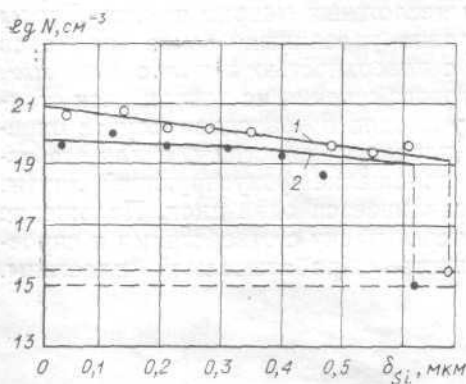


Рис. 3. Распределение концентрации по глубине слоя:
1 — фосфор, основа — кремний КДБ-4,5; 2 — алюминий, основа — кремний КЭФ-4,5

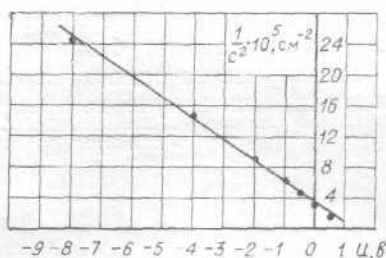


Рис. 4. Зависимость емкости перехода от обратного напряжения

Не удалось обнаружить сколько-нибудь заметного влияния окружающей среды (вода, атмосфера воздуха) на свойства легированных слоев.

Специальные эксперименты по облучению соответствующих образцов кремния в воздухе (без пленки алюминия) и в дистиллированной воде показали, что электрофизические свойства образцов в этих условиях при тех же энергетических режимах остаются такими же, как и до облучения.

Независимость эффекта легирования от фазы лигатуры, по-видимому, является следствием общности механизма легирования в том и другом случае.

Качественное рассмотрение процесса с учетом мощности излучения позволяет заключить, что наиболее реальным механизмом является диффузионный. А именно, вследствие высокой мощности излучения образующийся в области взаимодействия плазменный факел [5] наряду с атомами основы оказывается насыщенным и парами примеси, поставщиком которых является в одном случае пленка алюминия, а в другом — раствор кислоты, окружающей область взаимодействия. Атомы (или ионы) примеси, как и атомы других компонент плазменного облака, проникают в жидкую пленку кремния, возникающую на некоторой стадии процесса. В результате пленка насыщается примесью, затем остывает и образует легированный слой. Таким образом, ситуация уподобляется той, которая имеет место в системе пар—расплав. На образование жидкой фазы во время процесса указывают наблюдаемые визуально капли и наплывы материала вокруг области взаимодействия. Если, исходя из предложенного механизма и используя известные значения коэффициентов диффузии алюминия и фосфора в жидком кремнии [6], рассчитать время существования расплава, необходимое для формирования легированного слоя с приведенными выше параметрами, то получается величина $5 \cdot 10^{-7} \text{ сек}$. Учитывая наблюдавшееся длительное

(наблюдения ограничивались интервалом 100 нсек) существование плазменного облака после окончания импульса [5], такую величину можно считать реальной.

На практике лазерное легирование использовано нами для получения планарных кремниевых диодов и несложных матриц из них. Диоды изготавливались либо из целого образца указанных выше размеров путем разрезания его на кристаллы с поверхностью в плане 1×1 мм², либо в виде локальных областей кругового сечения на поверхности стандартных кремниевых пластин. Размер диодов в последнем случае определялся диаметром светового луча в плоскости пластины, и для его изменения достаточно было изменить положение фокусирующей линзы. В этом случае за один выстрел изготавливается один диод. Положение меняется, если излучение пропустить через маску с отверстиями и спроецировать ее изображение на поверхность обрабатываемой пластины.

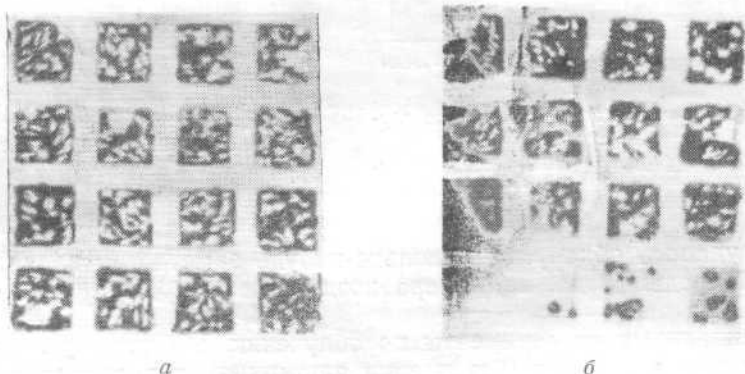


Рис. 5. Вид диодной матрицы, сформированной за один импульс лазерного излучения ($\tau \sim 10^{-8}$ сек):

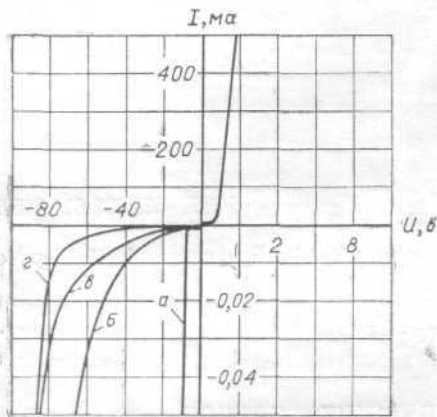
a — полное воспроизведение маски; *б* — частичное воспроизведение маски

Очевидно, что производительность метода при этом возрастает и определяется лишь сложностью маски и параметрами светового луча. Показана система из 16 диодов, полученная за один выстрел (рис. 5 а). Меняя размер отверстий в маске и их плотность, можно легко управлять сложностью результирующей диодной матрицы. В нашем случае конфигурация и число диодов определялись имевшейся в наличии маской. Идентичность электрических свойств диодов в матрице и диодов в различных матрицах определяется главным образом такими параметрами излучения, как распределение интенсивности по сечению луча и воспроизводимость световых импульсов при их повторении.

Как известно, энергия излучения рубинового лазера распределена по сечению луча не равномерно и меняется от импульса к импульсу случайно. Поэтому диоды в полученных матрицах не одинаковы по свойствам, а сами матрицы зачастую даже не воспроизводятся полностью (рис. 5 б).

Прямые ветви вольт-амперных характеристик диодов во всех случаях подобны, обратные же зависят от размеров диода (рис. 6). При диаметре диода 50 мкм обратный ток при 80 в составляет 10 мка, что значительно меньше, чем у диодов, полученных в работах [2, 3].

При сравнимых размерах полученные диоды мало отличаются от обычных диффузионных. Таким образом, в случае разработки соответ-



ствующих лазерных систем и обработки некоторых технологических моментов лазерный метод изготовления диодных матриц различного назначения представляется наиболее оптимальным в свете требований промышленного производства. Помимо этого, ла-

Рис. 6. Вольт-амперные характеристики кремниевых диодов, сформированных с помощью лазера:

диаметр диода: а — 750 мкм; б — 250 мкм; в — 150 мкм; г — 50 мкм

зерное легирование, на наш взгляд, может найти применение в качестве лабораторного эксперсс-метода при изучении влияния различных присадок на свойства тех или иных материалов в случаях, когда изготовление специальных образцов известными методами затруднительно или невозможно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gaylino F. P., Lumley R. M., Watkins L. S. «Proceedings of the IEEE», 1969, 57, 114.
2. Fairfield I. M., Schwutke G. H. «Solid State Electronics», 1968, 11, 1175.
3. «Электроника» (русский перевод), 1969, № 11, 36.
4. Кутолин С. А., Компанец В. Х. Исследование характера воздействия когерентного оптического излучения на полупроводниковые материалы и определение возможности использования его для проведения локальных диффузионных процессов на кремнии. Отчет № 869, Новосибирск, 1969.
5. Басов Н. Г., Бойко В. А. и др. ЖЭТФ, 1966, 51, 989.
6. Реньян В. Р. Технология полупроводникового кремния. М., «Металлургия», 1969.

Статья поступила в июне 1971 г.