

ТВЕРДОФАЗНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СО₂-ЛАЗЕРА

Княк С. Г., Кречун В., Маненков А. А., Медиану Р., Михайлова Г. Н.,
Михэилеску И. Н., Прохоров А. М., Урсу И.

Исследованы особенности легирования кремния методом неравновесной твердофазной диффузии бора при локальном нагреве структуры примесь—полупроводник непрерывным и сканируемым излучением СО₂-лазера. Методом спектроскопии вторичных ионов определены концентрационные профили распределения бора в легированных слоях, сформированных путем облучения структур примесь—полупроводник как со стороны полупроводника, так и со стороны пленки легирующего элемента. В оптимальных режимах облучения получены легированные слои субмикронной толщины. Исследованы вольтамперные характеристики сформированных диодных структур.

Лазерные методы модификации свойств и структуры материалов находят все большее применение в полупроводниковом материаловедении и приборостроении. В частности, лазерное излучение эффективно используется для локального легирования полупроводниковых пластин, отжига радиационных дефектов в имплантированных полупроводниках, активации внедренной примеси, создания омических контактов, формирования *p-n*- и гетеропереходов [1]. К настоящему времени вопросу лазерного жидкофазного легирования полупроводников посвящено значительное число работ (см., например, [2]). Нами проводилось лазерное легирование кремния бором пространственно сканируемым излучением непрерывного СО₂-лазера [3]. При этом было показано, что осуществляется процесс твердофазного легирования: температура мишени существенно ниже температуры плавления кремния.¹

Целью настоящей работы явилось дальнейшее изучение процесса твердофазного лазерного легирования для получения структурно совершенных легированных слоев.

Исследования проводились на шлифованных и полированных (механически и химически) пластинах кремния марки КЭФ-15, ориентированных в плоскости (111), толщиной 0.5 мм, на поверхность которых методом вакуумного напыления наносилась пленка бора или В₂О₃ толщиной 100÷400 Å. Полученная структура помещалась в специальную камеру с инертным газом. Перед облучением образцы предварительно подогревались до температуры 400÷500 °С. Облучение проводилось излучением непрерывного СО₂-лазера (длина волны излучения λ=10.6 мкм) мощностью 1 кВт по всей поверхности образца с временем облучения ~1 с или при локальном воздействии на пластину лучом диаметром ~2 мм, сканируемым со скоростью 0.2÷0.05 см/с. Облучение осуществлялось как со стороны пленки бора, так и со стороны кремния.

Распределение примеси бора в легированных слоях исследовалось методом спектроскопии вторичных ионов (ВИМС) на микроанализаторе типа SMI-300. Оценка степени структурного совершенства легированных слоев производилась по полуширине кривых качания [монохроматическое излучение CuK_α,

¹ Позднее нам стала известна работа [4], в которой, по мнению авторов этой статьи, также осуществлялся процесс твердофазного легирования при облучении пленок Si и Al излучением импульсного YAG Nd-лазера.

отражение (511) и (333)] на рентгеновском двухкристальном спектрометре. Выявление полей напряжений, возникающих в локально легированных зонах кремниевых пластин, осуществлялось на рентгеновской установке типа Ru-200 методом Ланга.

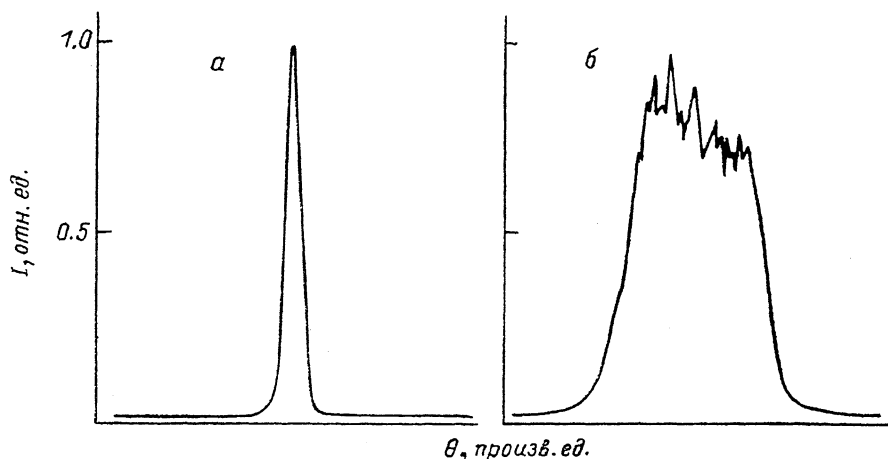


Рис. 1. Кривые качания для нелегированного (а) и легированного (б) кремния. Облучение проводилось со стороны кремния со скоростью сканирования луча 0.2 см/с.

Было обнаружено, что эффективное твердофазное легирование кремния бором на глубину $\sim 100 \text{ \AA}$ за время ~ 1 с происходит при температурах поверхности образца, составляющих примерно $800 \text{ }^\circ\text{C}$ (оценка температуры проводилась фотопироэлектрическим методом), достигаемых при воздействии на кремний лазерным излучением с плотностью мощности $\sim 400 \text{ Вт/см}^2$.² Поэтому использование для легирования сканируемого лазерного луча сопровождается наведением больших механических напряжений на границе между локально легированными областями и необлученными зонами пластины. Исследования показали, что полуширина кривых качания при отражении (333) практически совпадает для базовой и легированной областей пластин (т. е. $\theta_0 \approx \theta_1$) независимо от

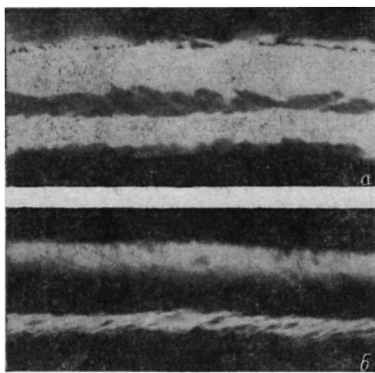


Рис. 2. Рентгеновские топограммы локально легированных областей кремния.

Облучение проводилось со стороны кремния со скоростью сканирования луча, см/с: а — 0.15, б — 0.28.

способа их получения. Однако при отражении (511) для слоев, легированных под действием сканируемого излучения, θ_1 может в 16 раз превысить значение θ_0 (рис. 1). Полученные данные позволяют заключить, что механические напряжения возникают преимущественно в направлении, параллельном облучаемой поверхности, и отсутствуют в перпендикулярном направлении. Дополнительные исследования локально легированных слоев методом рентгеновской топографии позволили выявить структуру полей напряжений, возникающих в зонах действия излучения (рис. 2). Из представленных топограмм следует, что зону действия сканируемого лазерного излучения можно разделить на три области: две области, непосредственно контактирующие с нелегированным материалом, и центральный участок легированного слоя. Периферийные участки

² При облучении образца со стороны полупроводника температура поверхности не измерялась.

характеризуются очень высоким уровнем напряжений, а центральный — минимальным. Исключить условия наведения термических напряжений в процессе легирования удается путем облучения кристаллов одновременно по всей поверхности импульсом излучения секундного диапазона. При этом совершенство легированных слоев не уступает исходному материалу.

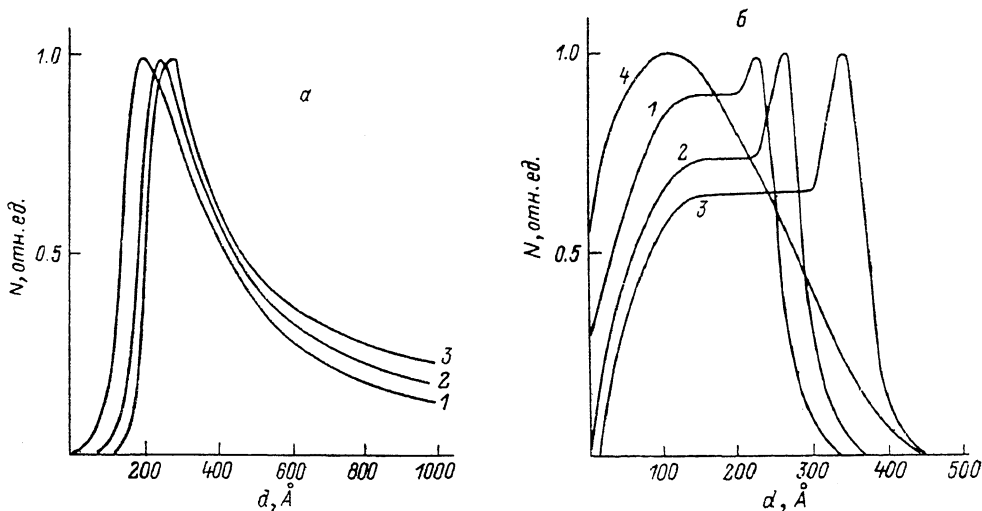


Рис. 3. Концентрационные профили распределения бора по глубине легированных слоев кремния.

а) облучение проводилось со стороны пленки бора со скоростью сканирования луча, см/с: 1 — 0.167, 2 — 0.098, 3 — 0.066; б) облучение со стороны кремния со скоростью сканирования луча, см/с: 1 — 0.28, 2 — 0.2, 3 — 0.15. 4 получена при однородном облучении всей поверхности образца импульсом с плотностью светового потока $\sim 400 \text{ Вт/см}^2$ и длительностью $\sim 1 \text{ с}$.

Исследования методом ВИМС позволили определить концентрационные профили распределения примеси бора в легированных слоях, сформированных при различных режимах облучения (рис. 3). При облучении структуры примесь — полупроводник со стороны пленки легирующей примеси максимальная концентрация бора в легированном слое возникает не на поверхности, а на некоторой глубине, изменяющейся от 190 до 386 Å для скоростей сканирования 0.2 и 0.05 см/с соответственно (рис. 3, а). Максимальная глубина легирования получена при наименьшей скорости сканирования. Аналогичная закономерность наблюдается и для начального участка концентрационного распределения бора

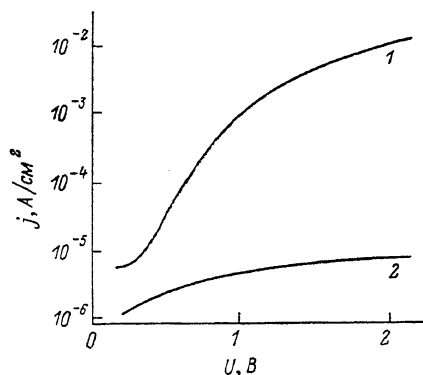


Рис. 4. Вольт-амперная характеристика кремниевых диода при прямом (1) и обратном (2) смещении.

в легированном слое: чем ниже скорость сканирования, тем глубже от поверхности расположен слой с одинаковой концентрацией бора. Идентичные профили были получены и при облучении образцов по всей поверхности импульсами лазерного излучения секундного диапазона.

Уменьшение скорости сканирования или увеличение длительности облучения приводит к увеличению времени диффузии примеси в глубь образца и возрастанию диффузии за счет более интенсивного разогрева. Поэтому максимальная глубина внедрения примеси наблюдается при наименьших скоростях сканирования. С другой стороны, процесс испарения примесей, продиффундировавших с поверхности в полупроводник, будет более существенным для мень-

пких скоростей сканирования, чем и можно объяснить характер изменения начальных участков распределения бора в легированных слоях.

Уменьшить влияние процесса испарения легирующих элементов на формирование концентрационных профилей распределения примесей удается путем облучения структуры примесь—полупроводник со стороны полупроводника (рис. 3, б). В этом случае пленка материала лигатуры, являясь источником диффузанта, одновременно препятствует его испарению. При этом происходит формирование однородно легированных слоев с более резким задним фронтом распределения примесей. Формирование концентрационного максимума на границе диффузионной зоны и матрицы кристалла (рис. 3, б, кривые 1—3), происходящее только при использовании сканируемого лазерного излучения, можно объяснить наведением механических напряжений при локальном легировании пластин (рис. 1, 2). Уменьшить механические напряжения, возникающие в процессе неравновесной твердофазной диффузии примесей, и повысить однородность легированных слоев удается путем облучения образцов одновременно по всей поверхности импульсом излучения секундного диапазона (рис. 3, б, кривая 4).

Отметим, что рассмотренные особенности лазерного легирования кремния наиболее четко проявляются именно при использовании длинноволнового излучения, для которого кремний является прозрачным, а поглощение световой энергии происходит в основном в пленке материала лигатуры.

Слоевое сопротивление полученной структуры, определенное четырехзондовым методом, составляет $7 \div 10 \text{ Ом}/\square$ и практически не зависит от того, что использовалось в качестве материала лигатуры — бор или B_2O_3 .

Существенное влияние на электрические свойства диодных структур, изготовленных на основе легированных слоев, оказывает подготовка поверхности материала. Типичная вольтамперная характеристика меза-структур площадью 1.5 мм^2 , полученных методом травления без дополнительной защиты поверхности, показана на рис. 4. Стандартная методика защиты поверхности диодов уменьшала токи утечки по поверхности на 2—3 порядка. При этом для лучших образцов токи утечки при обратном смещении $\sim 60 \text{ В}$ составляли $\sim 10 \text{ нА}$, а пробойное напряжение — $\sim 100 \text{ В}$.

Проведенные исследования показали, что излучение непрерывных лазеров на CO_2 может быть эффективно использовано для формирования легированных слоев на большой площади методом неравновесной твердофазной диффузии примесей. Относительная простота метода, совместимость с вакуумными технологическими процессами, а также высокая воспроизводимость параметров легированных слоев обуславливают перспективность применения метода для изготовления полупроводниковых структур.

Л и т е р а т у р а

- [1] Двуреченский А. В., Качурин Г. А., Нидаев Е. В., Смирнов Л. С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. М., 1982. 208 с.
- [2] Surface modification and alloying by laser, electron and ion beams / Ed. by J. M. Poate, G. Foti, D. C. Jacobson. N. Y., 1983. 652 p.
- [3] Княк С. Г., Кречун В., Маненков А. А., Михэилеску И., Михайлова Г. Н., Прохоров А. М., Урсу И. // Кр. сообщ. по физике ФИ АН СССР. 1987. № 3. С. 10—11.
- [4] Фистуль В. И., Павлов А. М. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 5. С. 854—858.

Институт общей физики
АН СССР
Москва

Получена 28.01.1988
Принята к печати 2.09.1988