

Двухимпульсный комбинированный лазерный отжиг кремниевых островков / Г.М. Гусаков, А.А. Комарницкий, В.Н. Кукин, О.И. Сафронова, Б.И. Седунов, В.В. Уздовский, В.И. Хайновский // Научное приборостроение -1992. -Т. 2.-№ 3: Лазеры и современное приборостроение. - С. 65-74.

Проведено исследование лазерной рекристаллизации поликремниевых островков на диоксиде кремния с использованием импульсных лазеров. Получены монокристаллические слои, которые исследовались с помощью просвечивающей электронной микроскопии. Наблюдалось возникновение дислокаций по периметру их боковых границ. Электронно-микроскопические изображения дислокаций свидетельствовали о наличии напряжений и деформаций кристаллической решетки в периферийных образцах монокристаллической структуры. С целью оптимизации температурных режимов рекристаллизации поликремния проведен теоретический расчет температурных полей в кремниевых островках. Решение для распределения температуры может быть выражено через эллиптический синус Якоби. Боковые потоки тепла приводят к неоднородному распределению температуры в образце, что обеспечивает зарождение и рост монокристалла из центра островка. Библ. 7 назв. Ил. 6.

Г. М. Гусаков, А. А. Комарницкий, В. Н. Кукин, О. И. Сафронова,
Б. И. Седунов, В. В. Уздовский, В. И. Хайновский
(Институт электронной техники, Москва)

ДВУХИМПУЛЬСНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ КРЕМНИЕВЫХ ОСТРОВКОВ

Одним из перспективных путей увеличения степени интеграции БИС является создание трехмерных интегральных схем (ИС) [1]. Трехмерные ИС в отличие от современных планарных ИС должны содержать несколько функциональных слоев. В каждом таком слое формируется планарная ИС, выполняющая определенную функцию. Например, в верхнем функциональном слое может быть размещен интегральный фотоэлектрический преобразователь изображения, во втором — запоминающее устройство, а в нижнем слое (или в полупроводниковой подложке) — центральный процессор, схемы обрaмления и т. д. Для уменьшения взаимного влияния электрических сигналов ИС функциональных слоев между ними должны присутствовать изолирующие слои и экраны [2].

Достоинствами трехмерных ИС являются повышенная радиационная стойкость, высокое быстродействие, компактность.

Ключевой процесс технологии кремниевых трехмерных ИС — получение монокристаллических слоев кремния на изолирующем диэлектрическом слое. Основная трудность здесь состоит в том, что применяемые в настоящее время в полупроводниковой технологии изолирующие материалы (двуокись кремния, нитрид кремния) являются аморфными. Поэтому непосредственным осаждением на них кремния нельзя получить монокристаллический слой.

Сейчас ведутся исследования по созданию трехмерных многослойных структур с использованием рекристаллизации слоев поликристаллического кремния посредством лазерного отжига [2—4]. Тонкая пленка поликристаллического кремния наносится методом химического газофазного осаждения на диэлектрическое покрытие полупроводниковой подложки. Затем с помощью лазерного облучения проводят ее рекристаллизацию (отжиг). В зависимости от устройства полной структуры, подвергаемой отжигу, режим отжига (скорость и направление сканирования луча, мощность излучения лазера, температура подогрева подложки и т. д.) подбирается таким образом, чтобы рекристаллизация прошла без повреждения функциональных слоев.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования рекристаллизации поликремниевых пленочных островков с помощью импульсного неодимового лазера.

Морфология рекристаллизованных слоев поликремния исследовалась методами растровой и просвечивающей микроскопии. С целью оптимизации температурных режимов рекристаллизации проведен теоретический расчет квазистационарного распределения температуры в островке рекристаллизуемой поликремниевой пленки.

Анализ распределения температуры в кремниевом островке при лазерном отжиге

Рассматриваемая структура содержит островок пленки поликремния (рис. 1), расположенный на диэлектрическом слое. Толщина диэлектрика под краями пленки существенно больше, чем под центральной областью последней. Указанный профиль толщины диэлектрического слоя должен обеспечивать необходимое квазистационарное распределение температуры с минимальным ее значением в центральной области островка поликремния. При этом процесс рекристаллизации поликремния протекает с образованием монокристаллической структуры [3].

Поскольку толщина островка пленки поликремния h существенно меньше его длины $2l$, для простоты решения задачи будем считать температуру постоянной по толщине пленки. Уравнение теплопроводности, описывающее одномерное распределение температуры вдоль пленки поликремния, имеет вид

$$h c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = h \frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x} \right) + P - A [T(x) - T_0], \quad (1)$$

где C_v, ρ, κ — удельная теплоемкость, удельная плотность, коэффициент теплопроводности пленки поликремния, соответственно; P — мощность излучения лазера, поглощаемая на 1 см^2 площади поверхности пленки; A — коэффициент теплообмена, T_0 — температура окружающей среды. Введем безразмерные переменные

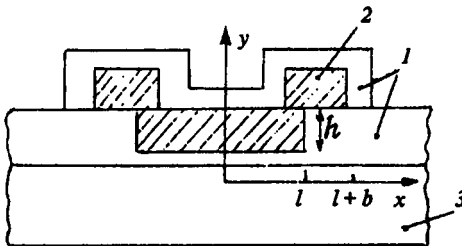
$$v = \frac{T - T_0}{T_0}, \quad \xi = x \sqrt{\frac{A}{D_R h c_v \rho}}, \quad \tau = t \frac{A}{c_v \rho h}; \quad (2)$$

коэффициент температуропроводности

$$D(T) = \frac{\kappa}{c_v \rho} = \frac{D_R}{1 + aT}.$$

Здесь $D_R = 0,94 \text{ см}^2/\text{с}$, $a = 0,0072 \text{ град}^{-1}$ [5].

Тогда с учетом (2) уравнение (1) приобретает вид



$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[D(v) \frac{\partial v}{\partial \xi} \right] + v_s - v = 0, \quad (3)$$

где $v_s = P / AT_0$.

Сначала получим стационарное решение уравнения (3) в области $-l \leq x \leq l$, т. е.

$$\xi_- \leq \xi \leq \xi_+, \quad (4)$$

где $|\xi_{\pm}| = l \sqrt{\frac{A}{D_R h c_v \rho}}$.

Рис. 1. Конфигурация кремниевого островка, расположенного на профилированном диэлектрике.

1 — диэлектрик (SiO_2), 2 — пленка поликремния, 3 — кремниевая подложка.

Для простоты также предположим, что коэффициент $D(v)$ достаточно слабо зависит от температуры. Тогда в уравнении (3) можно опустить член, содержащий производную $\partial v / \partial \xi$. Решение ищем в виде

$$v(\xi) = v_s + \theta(\xi), \quad (5)$$

где v_s — стационарное однородное решение (3). Подставив (5) в (3) и учитывая сделанные предположения, получаем уравнение для определения величины $\theta(\xi)$

$$\frac{d^2 \theta}{d\xi^2} = \beta \theta^2 + \alpha \theta, \quad (6)$$

в котором приняты следующие обозначения:

$$\beta = aT_0, \quad \alpha = 1 + \beta(v_s + 1). \quad (7)$$

В силу симметричности исследуемой структуры в области (4) относительно координаты $\xi = 0$ естественно предположить симметричность искомого решения. Поэтому в качестве краевых условий для решения уравнения (6) выберем такие:

$$\frac{d\theta}{d\xi} = 0 \quad \text{и} \quad \theta(\xi) = \theta_0, \quad (8)$$

где $\xi = 0$.

Решение задачи (6) — (8) приводит к эллиптическому интегралу первого рода и в конечном виде выражается через эллиптический синус Якоби [6]

$$\frac{\theta(\xi) - \theta_0}{\theta(\xi) - \theta_+} = \text{sn}^2 \left(\frac{\beta}{6} \sqrt{\theta_- - \theta_0} \xi, k \right). \quad (9)$$

Здесь $k = \sqrt{\frac{\theta_+ - \theta_-}{\theta_0 - \theta_-}}$ — модуль эллиптического синуса, $\theta_{\pm} = -\frac{1}{2}B \pm \sqrt{\frac{1}{4}B^2 - B\theta_0}$, $B = \theta_0 + \frac{3}{2}\frac{\alpha}{\beta}$.

Величина θ_0 , входящая в (9), определяется дополнительными условиями. Она может быть найдена, например, посредством задания температуры на краях островковой структуры.

В качестве примера рассмотрим решение уравнения для случая $k \approx 0$. Тогда $\theta_+ = \theta_- = -\alpha/\beta$, $\theta_0 = \frac{1}{2}\frac{\alpha}{\beta}$ и

$$\frac{\theta(\xi)}{\theta_0} = 1 + 3\text{tg}^2[(\sqrt{\alpha}/2)\xi]. \quad (10)$$

Из (10) следует, что $\theta(\xi)$ — монотонно возрастающая функция, поэтому действительно в центре островка поликремния (при $\xi = 0$) температура ниже, чем на его краях (при $x = \pm l$).

Теперь рассмотрим задачу о квазистационарном распределении температуры на концах островка, например, для области $l \leq x \leq l + b$, где оттока тепла в подложку не происходит. В данном случае применимо уравнение теплопроводности, аналогичное (1), в котором отсутствует член $A(T - T_0)$. Решение стационарного уравнения ищем в виде (5). При этом само стационарное уравнение для нахождения функции $\theta(\xi)$ имеет вид

$$\frac{d^2\theta(\xi)}{d\xi^2} + \gamma\theta(\xi) + \delta = 0, \quad (11)$$

где $\gamma = a T_0 v_s$, $\delta = v_s [1 + a T_0 (v_s + 1)]$, краевые условия следующие:

$$\frac{d\theta(\xi)}{d\xi} = 0, \quad \theta(\xi) = \theta^* \quad \text{при } x = l + b, \quad (12)$$

т. е. при $\xi_b = (l + b) \sqrt{\frac{A}{D_R h c_V \rho}}$.

Выражения (12) означают, что поток тепла вдоль оси x на краях островка отсутствует, а температура фиксирована величиной θ^* , которая определяется внешними условиями.

Решение задачи (11), (12) выглядит следующим образом:

$$\theta(\xi) = (\theta^* + \frac{\delta}{\gamma}) \cos[\sqrt{\gamma}(\xi_b - \xi)] - \frac{\delta}{\gamma}. \quad (13)$$

В реальных островковых структурах $b \ll l$, т. е. края островка, лежащие на толстом слое диэлектрика, существенно короче его центральной части, расположенной на тонком слое диэлектрика. Поэтому из (13) несложно получить уравнение

$$\theta(\xi_b) - \theta(\xi_l) \approx \frac{1}{2}(\theta^* + \frac{\delta}{\gamma}) [\gamma(\xi_b - \xi_l)^2]. \quad (14)$$

Из выражения (14) следует, что в силу малости расстояния $(\xi_b - \xi_l)$ изменением температуры на краях островковой структуры можно пренебречь и практически считать, что $\theta(\xi_l) = \theta^*$.

Метод экспериментальных исследований

В работе [3] описан метод рекристаллизации кремниевых островков на аморфном изолирующем слое путем косвенного лазерного нагрева с использованием аргонового лазера, который работает в непрерывном режиме. В настоящей статье приведены результаты экспериментального исследования лазерной рекристаллизации кремниевых островков на двуокиси кремния с применением импульсных лазеров в соответствии с методом [6,7]. Данный

метод лазерной обработки наиболее эффективен для решения задач, требующих прецизионного управления регулируемыми воздействиями. Рекристаллизация проводилась импульсным излучением неодимового лазера на длинах волн 0,53 и 1,06 мкм при длительности импульсов 50 и 70 нс соответственно. За счет варьирования временной задержки между лазерными импульсами удалось реализовать различные режимы обработки. Плотность энергии лазерных импульсов составляет 0,8 и 0,2 + 1,5 Дж/см² для видимого и инфракрасного излучения соответственно.

Исследовалось влияние импульсной лазерной обработки на рекристаллизацию поликремниевых островков размером 20×60 и 30×60 мкм и толщиной 0,3 + 0,4 мкм, которые были изолированы от монокристаллической кремниевой подложки слоем диоксида кремния толщиной 1 мкм. Поликремниевые островки изолировались от нанесенного на них поликремниевое "колпачка" толщиной 0,3 + 0,4 мкм слоем двойного диэлектрика, состоящего из слоя нитрида кремния толщиной 0,05 мкм и слоя диоксида кремния толщиной 0,1 мкм.

Электронно-микроскопические исследования

Рекристаллизованные с помощью лазерной обработки слои изучались с помощью метода просвечивающей электронной микроскопии. В зависимости от режимов обработки и толщины промежуточных диэлектрических слоев, а также от геометрических размеров островков имело место увеличение размеров зерна поликристаллического кремния.

При оптимальных режимах обработки кремниевые островки имели монокристаллическую структуру с ориентацией поверхности (100). Однако в этом случае возникали дислокации по периметру боковых границ островков. Электронно-микроскопические изображения этих дислокаций свидетельствуют о наличии напряжений и деформаций кристаллической решетки в периферийных областях монокристаллических структур.

Поликристаллическая структура исходного кремния, из которого изготавливается поликремниевый островок (рис. 2), представляет собой мелкозернистую поликристаллическую структуру с размером зерна, не превышающим 0,4 мкм. Кремниевые островки из исходного монокристаллического кремния были защищены диэлектрическими слоями диоксида кремния толщиной 0,08—0,1 мкм, слоем нитрида кремния толщиной 0,035—0,05 мкм. Это позволило предотвратить проникновение примесей из вышележащего слоя поликристаллического кремния ("кремниевый колпачок"), на который воздействовало лазерное излучение и который обеспечивал не только вертикальные, но и боковые потоки тепла через периферийные боковые области кремниевого островка, создавая при этом неоднородное распределение температуры в кремниевом островке в процессе его лазерной обработки.

На электронной микрофотографии кремниевого островка после обработки его лазерным излучением (рис. 3, увеличение соответствует увеличению рис. 2), видно, что при определенных режимах лазерной обработки и конфигурации профиля диэлектрика, на котором расположен поликремниевый островок, происходит значительное укрупнение размера зерна поликристаллической кремниевой структуры. В данном случае он увеличился от 0,1 до 2—8 мкм.

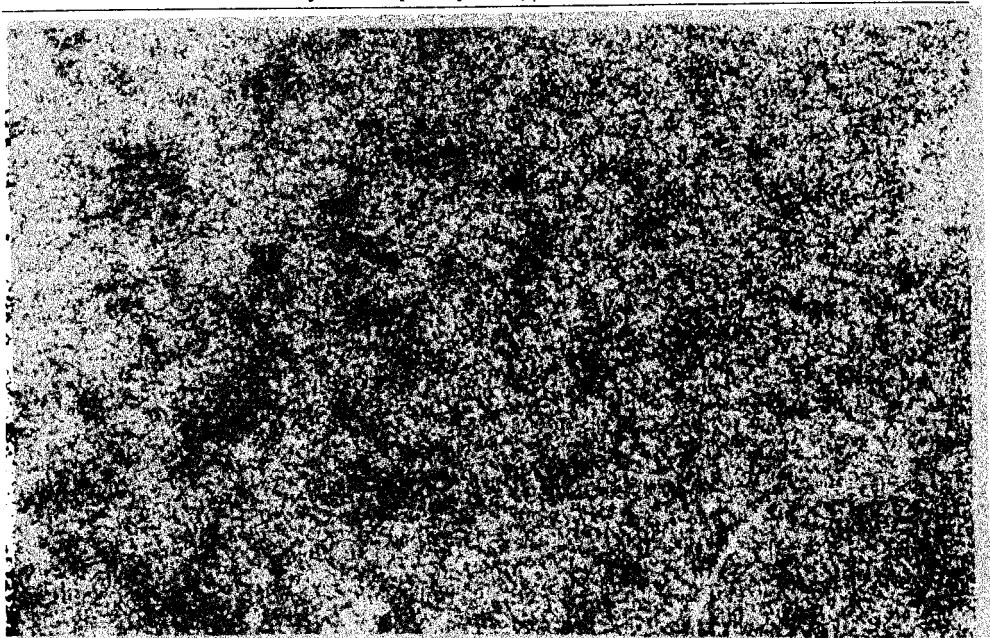


Рис. 2. Электронно-микроскопическая фотография исходного поликристаллического кремния, использованного для формирования кремниевого островка.



Рис. 3. Электронно-микроскопическая фотография поликремниевого островка с укрупненным размером зерна после лазерной обработки кремниевых островков.

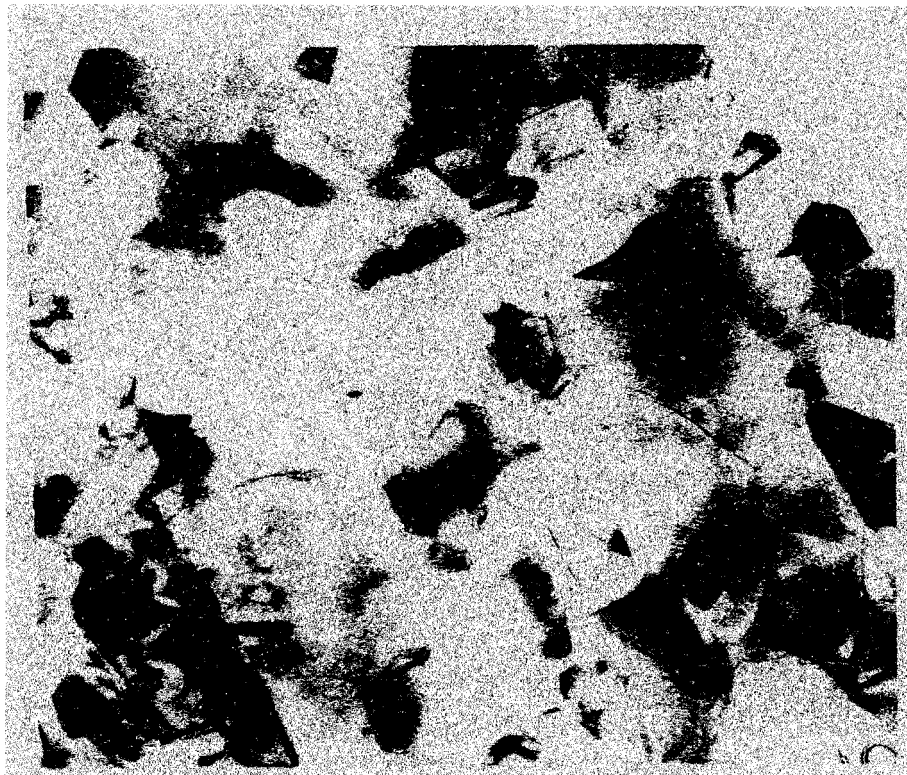


Рис. 4. Электронно-микроскопическая фотография фрагмента кремниевого островка с размером зерна, укрупненным до $2 + 8$ мкм, поликристаллической кремниевой структуры после лазерной обработки.

Электронно-микроскопическая фотография участка кремниевого островка (рис. 4) соответствует тем же режимам лазерной обработки и конфигурации профиля диэлектрика, на котором расположен кремниевый островок, что и фотография, представленная на рис. 3. На микрофотографии видна четко выраженная поликристаллическая структура кремния с укрупненным размером зерен от 2 до 8 мкм. Светлая граница сверху и слева соответствует границе кремниевого островка, расположенного на слое диоксида кремния толщиной до 0,1 мкм. Светлая область поликристаллической кремниевой структуры в правом нижнем углу отвечает уменьшенной в несколько раз толщине слоя диоксида кремния, на котором расположен кремниевый островок. Результаты электронно-микроскопических исследований по дифракции электронного пучка на поликристаллической структуре кремниевого островка подтверждают наличие поликристаллической структуры в кремниевых островках данного типа: имеется четко выраженный максимум и концентрически расположенные кольцевые области дифракционной картины. Тот факт, что концентрически расположенные области дифракционной картины не являются сплошными, обусловлен тем, что толщина поликремниевого островка была недостаточна для формирования сплошного кольца и не превышала в исследованных кремниевых островках 0,4 мкм.



Рис. 5. Электронно-микроскопическая фотография периферийной области монокристаллической кремниевой структуры кремниевого островка с ярко выраженными дислокациями.

Электронно-микроскопическая фотография периферийной области монокристаллического кремниевого островка (рис. 5) получена тем же методом, что и кремниевые островки с увеличенным размером зерна (см. рис. 3, 4), но при этом были изменены режимы лазерной обработки и параметры профилированного диэлектрического слоя, на котором был расположен кремниевый островок. На микрофотографии четко выражены дислокации, природа которых требует дополнительных исследований. По-видимому, одной из причин появления дислокаций данного типа в периферийной области кремниевого островка является возникновение в процессе лазерной обработки значительных механических напряжений в кремниевом островке, расположенном под кремниевым колпачком.

Электронно-микроскопическая фотография границы периферийной и центральной областей монокристаллического кремниевого островка после лазерной обработки (рис. 6) свидетельствует о том, что дислокации, возникающие в периферийной области в кремниевом островке, исчезают в центральной его части. Следует отметить, что кристаллическая структура в кремниевом островке и в периферийной области и в центральной была монокристаллической, что подтверждают результаты электронно-микроскопических исследований дифракции электронов на структуре кремниевых островков.



Рис. 6. Электронно-микроскопическая фотография границы периферийной и центральной областей монокристаллического кремниевого островка после лазерной обработки.

Таким образом, метод лазерной обработки кремниевых островков эффективен для получения монокристаллических кремниевых слоев, расположенных на диэлектрической подложке. Боковые потоки тепла приводят к неоднородному распределению температуры в образце, что обеспечивает увеличение температуры на краях кремниевого островка, в центре которого образуется область с минимальным значением температуры. Такое распределение температуры приводит к зарождению и росту монокристалла из центра островка.

Экспериментальные исследования кремниевых структур показали возможность получения монокристаллических островков с использованием двухимпульсного метода лазерной рекристаллизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коэн Ч.Л. // Трехмерные ИС и связанные с ними перспективы. 1983. Т. 56, № 19. С. 15.
2. Акасахи К. // ТИИЭР. 1986. № 12. С. 84.
3. Mukai R., Sa Saki N., Iwai T. e. a. // Appl. Phys. Lett. 1984. V. 44, 10. P. 994.
4. Nao-Abi Aizaki // Ibid. № 7. P. 686.

5. Гусаков Г.М., Камарницкий А.А. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13, № 3. С. 166.
6. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции : Пер. с нем. 1977.
7. Вернер В.Д., Гусаков Г.М., Саркисян С.С., Эм А.С. // Поверхность: Физика. Химия. Механика. 1985. № 5. С. 91.

Рукопись поступила 6.02.92