

ЭЛИТ-ПРОЦЕСС СЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Одной из основных целей микро- и наноинженерии с точки зрения минимизации размеров, увеличения надежности и уменьшения стоимости электронных изделий является возможность интегрировать микроэлектронную процессорную схему в микрообработанные структуры для того, чтобы произвести полностью интегрированные сенсорные микросистемы (МЭМС) с интеллектуальной специализированной системой обработки информации (рис. 1) [1, 2].

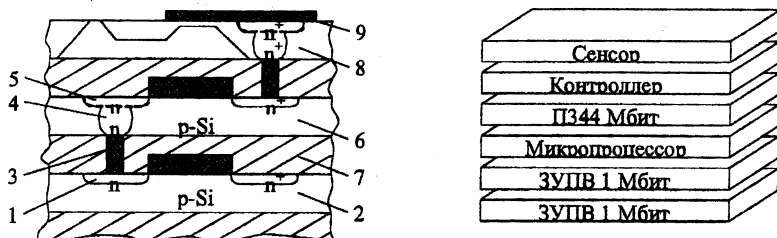


Рис. 1. Структура вертикальной МЭМС

1 — сток; 2 — полупроводниковый слой; 3 — проводник; 4 — диффузионный слой;
5 — исток МДП-транзистора; 6 — полупроводниковый слой; 7 — двуокись кремния;
8 — микропрофилированная МЭМС; 9 — коммутация

Для этих целей разработан ЭЛИТ-процесс изготовления объемных (или трехмерных) микроструктур и сенсорных микросистем в едином технологическом цикле [3,4].

При помощи лазерного луча (рис. 2) коротковолнового излучения $h\nu > E_g$, где $h\nu$ — энергия кванта электромагнитного излучения, E_g — ширина запрещенной зоны, генерирующего свободные носители тока в приповерхностном объеме полупроводниковой подложки 2, и лазерного луча 3 длинноволнового излучения ($h\nu < E_g$), поглощаемого свободными носителями тока, создают зону электронного расплава 4 в приповерхностном объеме полупроводниковой подложки 2. Затем ионно-лучевым ускорителем (ИЛУ) 5, содержащим ионный источник 6, ускоряющий электрод 8, формируют ионный пучок 9 и вводят при помощи его примеси в зону электронного расплава 4 в приповерхностном объеме полупроводниковой подложки 2. Аналогично может быть создана легированная зона электронного расплава 4 в приповерхностном объеме ниж-

ней стороны полупроводниковой подложки 2. Транспорт зоны электронного расплава 4 осуществляют электрическим полем, возбуждаемым ионными пучками 9 и электронными лучами 10. Электронные лучи 10 формируются электронными прожекторами (ЭП) 11, содержащими катод 12, анод 13, модулирующий электрод 14.

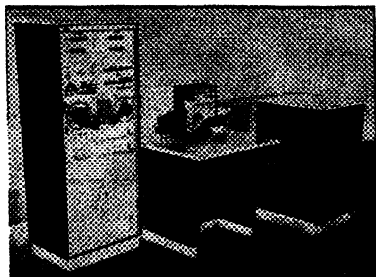
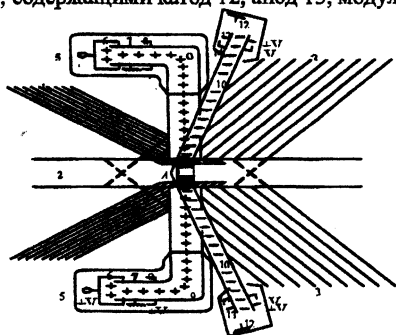


Рис. 2. Способ ЭЛИТ-процесса и установка для изготовления сенсорных микросистем

Транспортированные электроны поглощают длинноволновые электроны излучения и передают энергию кристаллической решетке, что приводит к формированию вторичной зоны электронного расплава. Электронный газ вторичной зоны электронного расплава транспортируется электрическим полем дальше в глубь полупроводника и опять поглощает длинноволновое излучение, что приводит к формированию следующей зоны электронного расплава. Таким образом происходит перемещение переднего фронта зоны электронного расплава

Скорость и направление транспорта зоны электронного расплава 4 зависит от величины и направления электрического поля, однако максимальная скорость транспорта зоны расплава не может превышать максимальной скорости дрейфа соответствующих носителей тока $V_{\text{макс}}$ (для электронов в кремнии $V_{\text{макс}} = 8.5 \cdot 10^5$ см/с). Величина и направление электрического тока задаются потенциалами на модулирующих электродах 14 ($V_{\text{м}}$) ЭП 11 и потенциалами ионных источников ($V_{\text{ион}}$) ускорителя ИЛУ 5. При фиксированных энергиях и дозах ионов ($V_{\text{ион}} = \text{const}$) токи варьируют изменением потенциалов $V_{\text{м}}$ на электродах 14 и создают проводящий канал 15 на любую глубину [5]. Возможны как непрерывный процесс ионного легирования зоны электронного расплава одновременно с прогонкой, так и чередование процесса ионного легирования с прогонкой легированной зоны электронного расплава, а также микро-нанопрофилирование полупроводника или локальное окисление. Подавая на электроды ИЛУ 5 и ЭП 11 соответствующие потенциалы, проводят многократную прогонку легированной зоны электронного расплава 4 в проводящем канале 15, насыщая его примесями, вплоть до процесса удаления материала заданной конфигурации микропрофилирования [6].

Необходимо также, чтобы длина волны лазерного излучения с энергией квантов $h\nu < E_g$ находилась в области пропускания обрабатываемого материала. Например, длина волны излучения CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) лежит в области пропускания большинства полупроводников: Si (область пропускания $\lambda = 1,2 \dots 15$ мкм), Ge ($\lambda = 1,8 \dots 23$ мкм), GaAs ($\lambda = 1,0 \dots 15$ мкм), CdTe ($\lambda = 0,9 \dots 16$ мкм), InP ($\lambda = 1,0 \dots 14$ мкм), InSb ($\lambda = 7,5 \dots 16$ мкм). Кроме того, от длины волны λ лазерного излучения зависит коэффициент поглощения α на свободных носителях (электронах) и глубина проплавленного слоя $d_{\text{пл}}$. Например, для кремния, если поглощение на электронах обусловлено рассеянием на ионизированных примесных атомах и дефектах, коэффициент поглощения определяется формулой

$$\alpha \approx 1,2 \cdot 10^{-39} N_i \cdot h_e Z_p^2 \lambda e^{3,5}, \quad (1)$$

где N_i — концентрация ионизированных примесных атомов и дефектов (см^{-3}); h_e — концентрация свободных электронов (см^{-3}); Z_p — число протонов в ядре примесного атома; λ_e — длина волны излучения, поглощаемого на свободных электронах (мкм), размерность числового множителя такова, что $[\alpha e] = 1 \text{ см}^{-1}$.

Глубина проплавления слоя $d_{\text{пл}}$ определяется из условия баланса между удельной теплотой плавления и энергией, поглощаемой свободными электронами в слое толщиной $d_{\text{пл}}$:

$$Q_{\text{пл}} \rho = 1,6 \cdot 10^{-19} h \nu h_m Q_e (1 - R_e) \alpha e d_{\text{пл}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{пл}}$ — удельная теплота плавления (Дж/г); ρ — плотность полупроводника (г/см^3); h_m — предельная концентрация фотогенетизированных электронов; Q_e — квантовая эффективность поглощения излучения $h\nu < E_g$ электронами; R_e — коэффициент отражения излучения $h\nu < E_g$. Оценка величины $d_{\text{пл}}$ для кремния ($Q_{\text{пл}} = 164$ Дж/г; $\rho = 2,33$ г/см³; $h_m = 1,49 \cdot 10^{21}$ см⁻³), легированного атомами серы ($Z_p = 16$), при типичных значениях параметров $N_i \approx 10^{19}$ см⁻³, $Q_e \approx 1$, $(1 - R_e) \approx 0,3$ и длине волны лазерного излучения $\lambda_e = 10,6$ мкм, дает: $d_{\text{пл}} \approx 9$ нм.

Минимальная плотность потока q_m ($h\nu > E_g$) лазерного излучения с энергией квантов большей ширины запрещенной зоны, необходимая для фотогенерации предельной концентрации носителей тока h_m , определяется соотношением:

$$q_m (h\nu > E_g) \approx \frac{2 \cdot 10^{-19} \cdot n_m}{Q_B (1 - R_B) \cdot \alpha_B \cdot \lambda_B}, \quad (3)$$

где Q_B — квантовая эффективность поглощения излучения $h\nu > E_g$ при межзонных переходах; R_B — коэффициент отражения излучения $h\nu > E_g$; α_B — коэффициент поглощения при межзонных переходах; λ_B — длина волны излучения, соответствующая энергии квантов $h\nu > E_g$. Оценка для кремния ($\alpha_B \approx 10^4$ см⁻¹) при типичных значениях параметров $Q_B \approx 1$, $(1 - R_B) \approx 0,3$ и длине волны лазерного излучения $h\nu > E_g$ определяется временем, необходимым для проплавления материала на глубину $d_{\text{пл}}$:

$$t_m(\hbar\nu > E_g) = t_m(d_m) = \frac{Q_m \cdot \rho \cdot d_m}{P(\hbar\nu < E_g)}. \quad (4)$$

Например, для кремния и плотности потока P ($\hbar\nu < E_g$) CO_2 — лазера, равной 40 Вт/см^2 имеем $t_m(\hbar\nu > E_g) \cong 8 \text{ мкс}$.

Для пучка лазера, сфокусированного в 10 раз P ($\hbar\nu < E_g$) = $4 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ t_m ($\hbar\nu > E_g$) $\cong 80 \text{ нс}$.

Минимальная плотность потока q_m ($\hbar\nu < E_g$) с энергией квантов меньшей ширины запрещенной зоны, необходимая для проплавления подложки толщиной l , определяется удельной теплотой плавления материала:

$$q_m(\hbar\nu < E_g) \cong Q_m \cdot \rho \cdot l. \quad (5)$$

Например, для кремниевой подложки толщиной $l = 300 \text{ мкм}$

$$q_m(\hbar\nu < E_g) \cong 11,5 \text{ Дж/см}^2.$$

Минимальная длительность импульса лазерного излучения $\hbar\nu > E_g$

$$t_m(\hbar\nu > E_g) = \frac{Q_m \cdot \rho \cdot l}{P(\hbar\nu < E_g)}. \quad (6)$$

Например, для сфокусированного в 10 раз лазерного пучка

$$t_m(\hbar\nu < E_g) \cong 3 \text{ мс}.$$

Электрический ток через локальный объем, равный суммарному току электронных и ионных пучков I , связан с величиной электрического поля $E \cong V/l$ соотношением:

$$I = (S / \rho_x) E, \quad (7)$$

где V — разность потенциалов между поверхностями подложки в проводящем канале; S — поперечное сечение канала; ρ_x — локальное удельное сопротивление подложки в области проводящего канала.

Можно сделать оценку величины тока пучков I . Например, при $V = 10 \text{ В}$, $l = 300 \text{ мкм}$, $S = 60 \times 40 \text{ мкм}$ (например, площадь эмиттера транзистора), $\rho_x = 20 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ток пучков $I \cong 4 \cdot 10^{-4} \text{ А}$; при $S = 1 \text{ мкм}^2$ и тех же значениях V , l , ρ_x ток пучков $I \cong 2 \cdot 10^{-7} \text{ А}$. Если же использовать высокоомную подложку с удельным сопротивлением $\rho_x = 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, то при $S = 1 \text{ мкм}^2$ и прежних значениях V , l необходимый ток пучков равен $4 \cdot 10^{-9} \text{ А} = 4 \text{ нА}$. Таким образом, для ЭЛИТ-процесса использование высокоомных подложек оправдано как с технологической точки зрения (возможно использование слаботочных пучков, например, растровых электронных микроскопов), так и схематический (лучшая изоляция компонентов микросистем).

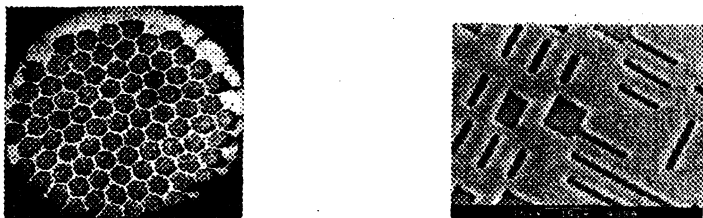


Рис. 3. Вид обработки при ЭЛИТ-процессе микроинженерии кремния

Поперечное сечение формируемого проводящего канала можно изменять вдоль канала в зависимости от режимов формирования электронного, ионного и лазерных лучей (рис. 3).

Возможно использование лазерных излучений как в режиме свободной генерации (непрерывное излучение), так и в режиме модулированной добротности (импульсное излучение). Выбор указанных режимов зависит от режимов работы электронного источника (ЭИ) и ионно-лучевого ускорителя (ИЛУ). Например, если длительность импульсов ЭИ и ИЛУ равны длительности импульсов t_m ($\hbar\nu < E_g$), необходимой для проплавления подложки, то излучение $\hbar\nu < E_g$ может быть непрерывным. Возможны другие соотношения между длительностями лазерных импульсов и импульсов ЭИ и ИЛУ, что позволяет реализовать различные режимы формирования проводящих каналов (например, непрерывный процесс ионного легирования зоны электронного расплава одновременно с прогонкой, или чередования процесса ионно-электронного легирования с прогонкой легированной зоны электронного расплава) [7].

Таким образом, лазерный поток I_1 с энергией квантов $\hbar\nu > E_g$ образует на одной стороне полупроводникового кристалла жидкофазную область (ЖФО). Со стороны другой поверхности полупроводник облучается лазерным потоком I_0 , с энергией квантов $\hbar\nu < E_g$ для которого кристалл очень прозрачен. Поток I_0 поглощается в ЖФО на некоторую глубину. Причем, если энергия, поглощенная от потока I_0 превышает теплоту плавления полупроводника и компенсирует поток теплопроводности от ЖФО, то поток I_0 может поддерживать эту область в метастабильном состоянии при выключенном потоке I_1 . Прикладывая к системе твердотельная область (ТФО)-ЖФО-ТФО разность потенциалов (например, при помощи электронного и ионного зондов) и вводя в ЖФО ионной имплантацией примесь, можно реализовать условия для направленного движения легированной ЖФО через полупроводник. ЖФО везде, за исключением границ, электронейтральна и имеет структуру электронного расплава. Границы ЖФО находятся в областях полей прямого смещенного и обратного смещенного потенциальных барьеров. Под действием электрического поля обратного смещенного барьера происходит эмиссия электронов в ТФО, а сила Лоренца, обусловленная этим полем, воздействует на положительные ионы на границе ЖФО и последняя как единая (континуум) перемещается со скоростью V_L , пропорциональной напряженности электро-

магнитного поля этого барьера. Скорость V_L определяется из решения системы фомологических уравнений для обобщенных потоков I_i , I_Q и обобщенных сил X_i и X_Q :

$$I_i = \sum L_{ik} X_k + L_{iQ} X_Q, \\ I_Q = \sum_i L_{Qi} X_i + L_{QQ} X_Q, (i, k = A, B, C), \quad (8)$$

где L_{ik} , L_{iQ} — коэффициенты Онзагера: индексы A, B, C относятся к атомам матрицы, примеси и электронам.

При стационарных изотермических условиях неравновесной градиентно-зонной кристаллизации

$$V_L = \frac{eD\varepsilon}{kT} \left(1 - \frac{2r_A + 1}{r_A + 1} \frac{bT}{aH_L}\right)^{-1}, \quad (9)$$

где e — абсолютный заряд; k — постоянная Больцмана; D — коэффициент диффузии атомов; T — температура плавления; r_A — электрохимическая валентность атомов матрицы на границе ЖФО; a , b — коэффициенты температуропроводности и теплопроводности; H_L — величина близкая к энергии плавления полупроводника.

Конкретная оценка для кремния n -типа с концентрацией примеси $C_p \ll 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ дает $V_L = 15 \text{ м/с}$.

Производительность ЭЛИТ-процесса можно оценить временем формирования проводящего канала (временем разгонки примеси вдоль канала, имплантируемой через одну из поверхностей подложки). Из приведенных оценок для кремния видно, что время проплавления подложки на глубину (300 мкм) составляет 3 мс, за это время электродиффузия области расплава, легированной примесью, равно 3 мкс, т.е. процесс электродиффузии происходит в 100 раз быстрее, чем процесс расплава. Следовательно, при полном проплавлении подложки она практически полностью равномерно легируется за счет электродиффузии, т.е. формируется проводящий канал или система проводящих каналов, т.е. за доли секунд формируется, например, триггер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колешко В.М. Инженерия знаний при разработке интеллектуальных машин, технологий и систем. Мн., БИТА, 1998, 60 с. 2. Польшкова Е.В. Примако А.Ф. Нейросетевая технология сенсорных систем обоняния. //Машиностроение. Мн., 2002, вып. 18, с.580–587. 3. Колешко В.М. Способ изготовления полупроводниковых приборов и программных микросхем. Авторское свидетельство СССР № 1227052, 1984. 4. Колешко В.М., Евсеев Б.С. Способ обработки полупроводниковых структур. Авторское свидетельство СССР № 112770, 1983. 5. Колешко В.М. Способ обработки полупроводниковых структур. Авторское свидетельство СССР № 1144562, 1983. 6. Колешко В.М., Сергейченко А.В. Микропрофилирование кремния при создании сенсорных микросистем. //Машиностроение. Мн., 2003, вып. 19, с. 7. Колешко В.М. Способ создания ноннолегированных слоев. Авторское свидетельство СССР № 843632, 1982.