НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Г.М.Мўминова, А.Хакимов, М.Б.Худойбердиева, С.З.Зайнобидинов

Мақолада лазер нурланишларининг яримўтказгичли модда билан ўзаро таъсирлашувининг физик-кимёвий асослари кўриб чиқилган. Яримўтказгичли кремний кристалларини темир ва қалай билан легирлаш имкониятлари кўрсатилган ва шароитлари аниқланган. Киритилган атомларнинг нисбатан чуқур ва бир хил тақсимланишини таъминлайдиган лазерли технологик қурилманинг тузилиш чизмаси келтирилган.

Калит сўзлар: *лазер, легирлаш, тақсимланиш концентрацияси, сирт, диффузия, нурланиш импульси, эрувчанлик, преципитат, ионли имплантация, киришма атом.*

В статье рассматриваются физико-химические основы взаимодействия лазерного излучения с полупроводниковым веществом. Показаны возможности и определены условия легирования полупроводниковых кристаллов кремния примесными атомами железа и олова. Приведена схема лазерной технологической установки, позволяющей получать сравнительно глубокие и гомогенные профили внедренных атомов.

Ключевые слова: *лазер, легирование, концентрационный профиль, поверхность, диффузия, импульс излучения, растворимость, преципитат, ионная имплантация, примесный атом.*

The article studies the physic-chemical basis of the interaction of laser radiation with a semiconductor material. The possibilities and determine the conditions of alloying semiconductor crystals of silicon impurity atoms of iron and tin are shown. The schema of the laser technological settings and allows receiving relatively deep and homogeneous sections of interstitial are shown.

Key words: *laser, alloy, section concentration, surface, diffusion, radiation impulse, melting, precipitate, ionic implantation, impurity atom.*

Лазерное излучение видимого и инфракрасного диапазонов занимает достойное место среди перспективных на сегодня технологий. Уникальные свойства лазерного излучения позволяют осуществлять рекордные скорости энерговклада в обрабатываемый материал, производить очень тонкую локальную обработку, создавать сверхвысокие давления на поверхность и другие технологические воздействия на вещество. Использование лазерных технологий в электронной промышленности во многих случаях наиболее эффективный, если не единственно возможный вариант. Свою эффективность лазерные технологии продемонстрировали, в частности, в следующих процессах производства электронных изделий: осаждение и травление пленок; геттерирование и очистка полупроводниковых пластин; отжиг полупроводников, легирование примесями, модификация поверхностных слоёв, резка и обработка поверхности полупроводниковых образцов, нагрев и разрушение кристаллических твердых тел и другие [1].

Одним из основных технологических процессов управления параметрами полупроводниковых материалов в настоящее время является легирование их примесными атомами [2]. Процесс лазерного легирования по способу «пленка диффузианта - матрица» включает следующие этапы: нанесение пленки легирующего материала на матрицу и облучение её лазерным излучением. Выбор условий и среды, в которых осуществляется облучение, определяется степенью влияния окружающий среды и исходными параметрами материала (q, $E_л$/s,т,λ).

Процесс лазерного легирования твердотельного вещества можно представить в следующей последовательности:

– поглощение излучения в тонком слое облучаемого вещества (пленки) и быстрая (10^{-11}с) передача этой энергии кристаллической решетке поглощающего вещества;

– нагрев поверхностного слоя материала и его плавление в течение ~1нс, нагрев следующих слоев материала за счет её теплопроводности;

С.З.Зайнобидинов *– АДУ физика кафедраси профессори, физика-математика фанлари доктори;*
А.Ҳ.Ҳакимов *– шу кафедра доценти, физика-математика фанлари номзоди;*
Г.М.Мўминова, М.Б.Худойбердиева *– АДУ физика мутахассислиги магистрантлари.*

– одновременное существование расплава пленки легирующего материала и матрицы;

– окончание лазерного воздействия и взаимное перемешивание атомов пленки и матрицы. При этом формирование распределения легирующих атомов в расплаве определяет, в основном, диффузия частиц в соответствии с уравнением для концентрации легирующих атомов [3]

$$N(z)=N_0[1-erf(z/\sqrt{2Дt_{жид}})] \qquad (1)$$

где Д- коэффициент диффузии; $t_{жид}$ – время существования расплава;

– быстрое охлаждение (≥10^3град/с), фиксация концентрационного профиля легирующих атомов в слое матрицы.

Характерные результаты лазерного легирования полупроводника типа A_3B_5(GaAs) атомами олова при использовании лазеров на АИГ:Nd(λ=1,06мкм) и рубинового (λ=0,69мкм) при различных режимах облучения показаны на рис.1.

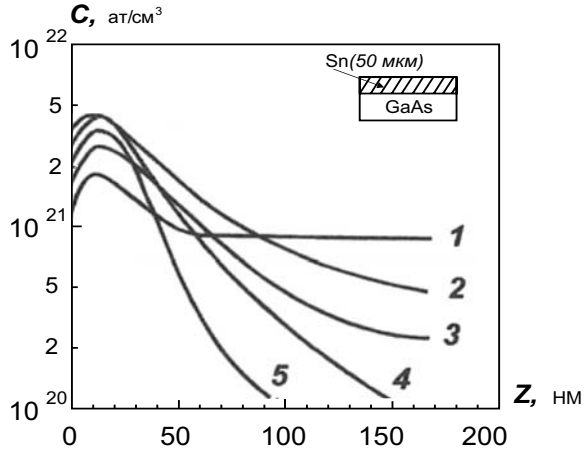

рис.1.

Видно, что концентрационный профиль распределения имеет максимум в районе 120 нм со значением C=(1,5-5)10^{21} атом/см^3. Нужно отметить, что при облучении рубиновым лазером профиль заметно уже и становится более гомогенным [4].

Интересные результаты, свидетельствующие о технологической эффективности лазерного легирования, получены при внедрении олова и железа в матрицы из кремния. Структурная схема лазерной технологической установки легирования приведена на рис.2.

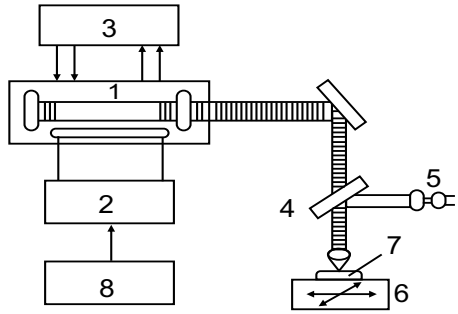

рис.2.

Плотность мощности излучения такой установки в фокальной плотности линзы $P=4P_б/τ_и F_ф^2 θ^2$, где $P_б$-выходная энергия лазера, $F_ф$-фокальное расстояние линзы, θ-расходимость пучка излучения, $τ_и$-длительность импульса излучения. Если θ=2….10 мрад, длительность импульса в режиме свободной генерации 0,5….5mc, фокусное расстояние линз 20-25 мм, мощность импульсов излучения 10 кВт….1 МВт, то плотность мощности излучения в фокальной плотности линзы составляет ~ 700 МВт/см^2.

Глубина проникновения луча δ, характеризуемая проходимым им расстоянием, на котором энергия излучения уменьшается в e раз составляет δ=1/α, где α – линейный коэффициент, поглощения матрицы. Для полупроводниковых кристаллов $\alpha=10^4\ldots10^5$см$^{-1}$.

Температура облучаемого материала определяется в данном случае выражениями [5]

$$T=\frac{2q\sqrt{bt}}{k}\left\{\frac{1}{\sqrt{\pi}}-\Phi^*\frac{r_0}{2\sqrt{bt}}\right\}+T_и \quad \text{когда } \sqrt{bt}>>\delta \quad \text{и} \qquad (2)$$

$$T=\frac{qt}{T_{c\delta}}\left\{1-\exp(-\frac{r_0^2}{4bt})-\frac{r_0^2}{4at}E_i(-\frac{r_0^2}{4bt})\right\}+T_и \quad \text{когда } \sqrt{bt}<<\delta \qquad (3)$$

где δ – глубина проникновения излучения, К – теплопроводимость матрицы, q-плотность матрицы, с- удельная теплоёмкость, $T_и$- начальная температура, $\Phi^*(x)=1-\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{\pi}}\int_0^\infty \exp(-\xi^2)^2 d\xi$; $E_i(-x)$ – интегральная показательная функция, b – температуропроводность матрицы, t – длительность воздействия излучения. Для материалов с высокой температуропроводностью (металл) $\sqrt{bt}>>\delta$; для неметаллов – $\sqrt{bt}<<\delta$.

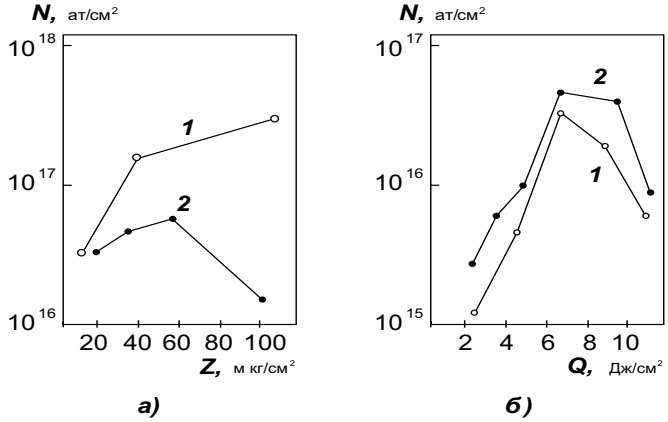

рис.3.

На рис.3. приведены зависимости поверхностной концентрации атомов изотоп ^{57}Fe и ^{119}Sn, внедренных в кремниевые монокристаллы с помощью такой установки. Эти рисунки показывают зависимость концентраций легирующих атомов от толщины пленки (а) и от плотности мощности лазерного излучения (б). Они также демонстрируют эффективность лазерного легирования для элементов, сильно различающимися коэффициентами диффузии в твердой фазе ($Д_{Sn}=8\cdot10^{-14}$см^2/с при 1200^{0}С, $Д_{Fe}=1\cdot10^{-5}$см^2/с при 1300^{0}С) и равновесными пределами растворимости ($C_{Sn}=8\cdot10^9$см$^{-3}$ при 1200^{0}С, $C_{Fe}=2{,}5\cdot10^{16}$см$^{-3}$ при 1300^{0}С). Несмотря на сильное различие поведения в кристаллическом кремнии при высокой температуре, концентрации атомов Fe и Sn в поверхностных слоях очень близки. Существенное превышение пределов равновесной растворимости и сравнительно большие глубины внедрения указывают на быструю неравновесную кристаллизацию расплава кремния с продиффузировавшими в него в жидкой фазе ($Д\geq10^{-4}$см^2/с) атомами Fe и Sn. Эти результаты показывают, что эффективность внедрения и состояние кристаллической решетки кремния после легирования в существенной мере зависят от толщины пленок легирующих материалов и плотности энергии лазерного излучения. Механизм легирования при этом слабо зависит от свойств легирующих атомов.

Последующий термоотжиг (при ~1000^{0}С) существенно улучшает состояние решетки легированного кремния и в отличие от термодиффузии не приводит к преципитации или сегрегации примесных атомов в поверхностном слое матрицы.

Структурные исследования показали, что внедренные атомы Sn находятся в узлах кристаллической решетки кремния, а атомы Fe распределяются поровну между узельными положениями и преципитатами в виде $FeSi_2$ – дисилицидов.

Таким образом, совокупность результатов большого количества опытов свидетельствует о том, что лазерное легирование сочетает в себе уникальные качества ионной имплантации и лазерного отжига ионно-имплантированных слоев, и позволяет получить сравнительно глубокие и гомогенные профили внедренных атомов, во многих случаях проще и экономичнее, чем ионная имплантация.

Литература:

1. Голубев В.С., Лебедев Ф.В. Физические основы технологических лазеров.- М.: ВШ,1987.
2. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов.- М.: Мир, 1986.
3. Zaynobidinov S.Z., Yo'lchiyev Sh., Nazirov D., Nosirov M. Yarimo'tkazgichlarda atomlar diffuziyasi.- T., 2012.
4. Рябов С.Г., Торопкин Г.Н., Усольцев И.Ф. Приборы квантовой электроники.- М.: Радио и связь, 1985.
5. Карлов И.В. Лекции по квантовой электронике.- М.: Наука, 1983.