

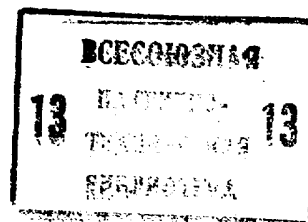


СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(19) **SU** (11) **1114246** **A**

4(51) Н 01 L 21/265

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ



ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(21) 3495290/18-25

(22) 23.07.82

(46) 30.06.85. Бюл. № 24

(72) В.Ю.Петухов, И.В.Хайбуллин
и М.М.Зарипов

(71) Казанский физико-технический ин-
ститут Казанского филиала АН СССР

(53) 621.382.002(088.8)

(56) 1. Прагтон М. Тонкие ферромаг-
нитные пленки. М., "Судостроение",
1967, с. 29-35.

2. Майселл Л.И. Нанесение тонких
пленок катодным распылением, в книге
"Физика тонких пленок", под
ред. Г.Хасса и Р.Туна, М., "Мир",
1968, с. 58-134 (прототип).

(54)(57) 1. СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ
МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК В ПОЛУПРОВОДНИКАХ,
включающий введение атомов магнитных
элементов с применением ионных пуч-
ков, отличающийся тем,
что, с целью повышения механической
прочности, твердости, химической
стойкости и адгезии магнитной пленки
к полупроводнику, бомбардировку по-

лупроводника осуществляют ионами
магнитных элементов с энергией 10-
500 кэВ, дозой облучения, определяе-
мой из соотношения $D = n \cdot d$, где n -
концентрация атомов в материале тон-
кой магнитной пленки и d - заданная
толщина тонкой магнитной пленки при
плотности ионного тока, лежащей в
диапазоне $6 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{13}$ ион/см²·с.

2. Способ по п.1, отличаю-
щийся тем, что бомбардировку
кремния производят ионами железа с
энергией $E = 10 - 40$ кэВ и дозой $D = 1,8 \cdot$
 $\times 10^{12} - 2,4 \cdot 10^{12}$ Fe⁺/см² при плотности
ионного тока $j = 6 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{13}$ Fe⁺/
/см²·с для магнитных пленок толщиной
20-30 нм.

3. Способ по п.1, отличаю-
щийся тем, что, с целью повыше-
ния намагниченности насыщения и рас-
ширения диапазона рабочих температур,
полученную структуру с магнитной
пленкой дополнительно отжигают при
температуре $500 \pm 50^\circ\text{C}$ в вакууме или
потоке сухого азота в течение 10-
30 мин.

(19) **SU** (11) **1114246** **A**

Изобретение относится к технологии получения тонких магнитных пленок (ТМП) на полупроводниковых подложках, т.е. пленок, имеющих толщину ≈ 100 нм, и может быть использовано в области микроэлектроники для изготовления управляемых магнитных приборов.

Известен способ получения ТМП путем вакуумного напыления, электролитического осаждения или термического разложения на нагретой поверхности подложки [1].

Недостатками способа является плохая твердость и прочность пленок. Наиболее близким к изобретению является способ получения тонких магнитных пленок в полупроводниках, включающий введение атомов магнитных элементов с применением ионных пучков [2]. Суть его заключается в следующем: поверхность катода, выполненного из материала формируемой магнитной пленки, например, железа, помещенного в специальную камеру, подвергают интенсивной ионной бомбардировке (обычно ионами инертных газов), в результате чего из катода выбиваются атомы, которые осаждаются на полупроводниковую подложку, например на кремний, и формируют ТМП.

Недостатками способа катодного распыления является то, что получение ТМП характеризуются низкой механической прочностью и твердостью. Например, твердость ТМП, полученных на основе чистого железа не превышает 4-5 единиц по Моссу, что затрудняет механическую чистку и применение их в жестких эксплуатационных условиях. Далее, будучи расположенными после напыления непосредственно на поверхности полупроводниковой подложки, такие пленки (особенно на основе железа) подвержены сильному химическому воздействию окружающей среды, в частности, окислению кислородом воздуха, что ухудшает магнитные свойства пленок и не допускает применения их в атмосфере, содержащей даже малые концентрации кислот и щелочей. И, наконец, способ катодного распыления для получения ТМП на полупроводниковой подложке не обеспечивает требуемые величины адгезии (сцепления) пленки к подложке. Это объясняется тем, что из-за малой величины энергии ($E \approx 21000$ эВ) распыляемых атомов в способе катодного распыления, они практи-

чески осаждаются непосредственно на поверхности полупроводниковой подложки, не проникая вглубь, в результате чего граница раздела 2-х разнородных сред пленка - подложка получается резкой, т.е. без переходной области, что и препятствует получению хорошей адгезии.

Цель изобретения - повышение механической прочности, твердости, химической стойкости и адгезии магнитной пленки к полупроводнику.

Цель достигается тем, что в способе получения тонких магнитных пленок в полупроводниках, включающем введение атомов магнитных элементов с применением ионных пучков, бомбардировку полупроводника осуществляют ионами магнитных элементов с энергией 10-500 кэВ, дозой облучения, определяемой из соотношения $D = n \cdot d$, где n - концентрация атомов в материале тонкой магнитной пленки и d - заданная толщина тонкой магнитной пленки, при плотности ионного тока, лежащей в диапазоне $6 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{13}$ ион/см²с, а также тем, что бомбардировку кремния производят ионами железа с энергией $E = 10 - 40$ кэВ и дозой $D = 1,8 \cdot 10^{17} - 2,4 \cdot 10^{17}$ Fe⁺/см² при плотности ионного тока $j = 6 \cdot 10^{12} - 6 \cdot 10^{13}$ Fe⁺/см²с для магнитных пленок толщиной 20-30 нм, также тем, что для повышения намагниченности насыщения и расширения диапазона рабочих температур, полученную структуру с магнитной пленкой дополнительно отжигают при температуре $500 \pm 50^\circ\text{C}$ в вакууме или в потоке сухого азота в течение 10-30 мин.

При указанных режимах внедрения ионов ТМП формируется на некоторой глубине от поверхности полупроводниковой подложки, т.е. представляет собой захороненный слой, защищенный сверху тонким слоем исходного полупроводника. В результате, механическая твердость и химическая стойкость полученной ТМП определяются, по существу, материалом подложки, например кремнием, который по этим параметрам существенно превосходит тонкие пленки Fe, Co, Ni.

Оптимально решается в этом случае и вопрос о повышении адгезии. В предлагаемом способе в отличие от известных ТМП формируется, как уже отмечалось, не на поверхности, а внут-

ри подложки и с плавными переходами по составу и свойствам от подложки к пленке, т.е. без резких границ раздела между разнородными средами пленка-подложка. Благодаря этому реализуется максимально возможная адгезия ТМП с полупроводниковой подложкой.

Конкретные значения или интервалы допустимых изменений параметров (E, D, j), определяющих режимы ионной имплантации, вытекают из необходимости выполнения следующих основных условий зарождения и роста ТМП заданной толщины и в заданной области внутри полупроводника: наличия достаточного количества ферромагнитных атомов в заданной области формирования ТМП; наличия центров преципитации (выпадения в осадок) внедренной примеси в заданной области формирования ТМП; малая растворимость атомов материала ТМП в подложке.

Всем этим условиям удовлетворяет бомбардировка полупроводников (например, Si или Ge) ионами магнитных элементов, например железа, кобальта, никеля, для которых предел растворимости не превышает $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. При этом центрами преципитации являются микропоры, образующиеся при указанных режимах ионной бомбардировки (E, D, j) в приповерхностном слое полупроводника.

Режимы ионной бомбардировки определяются из следующих соображений. Энергия иона E определяет величину его среднего проекционного пробега ΔR_p и среднеквадратичного отклонения ΔR_p , которые, в свою очередь, определяют глубину залегания пленки, ее толщину, а также толщину верхнего защитного слоя. Причем сверху энергия иона, в принципе, не ограничена. Однако учитывая типовые характеристики используемых ионных ускорителей, энергию иона E можно ограничить сверху величиной 500 кэВ. Ограничение снизу величиной $E=10$ кэВ связано с тем, что при дальнейшем уменьшении E уже не удастся получить качественный защитный слой из материала подложки над сформированной пленкой ТМП.

Доза облучения определяется необходимым количеством атомов материала ТМП, чтобы обеспечить формирование магнитной пленки заданной толщины.

Поскольку на практике толщина ТМП является варьируемым параметром, то необходимая доза облучения также не может быть фиксированной величиной и определяется из соотношения

$$D = n \cdot d \quad (\text{ион/см}^2),$$

которое непосредственно вытекает из указанного выше условия.

Плотность тока в ионном пучке j определяет, с одной стороны, скорость генерации и накопления радиационных дефектов с образованием, в конечном счете, микропор - центров преципитации внедренной примеси. С другой стороны, при увеличении j выше некоторой величины, степень радиационного нагрева становится столь значительной, что температура облучаемой поверхности полупроводника превышает температуру отжига $T_{отж}$ радиационных дефектов. В результате этого происходит их эффективный отжиг непосредственно в процессе бомбардировки, что препятствует образованию в бомбардируемом слое микропор, т.е. не выполняется второе необходимое условие формирования ТМП. В связи с этим на величину j накладывается ограничение сверху. Экспериментально было установлено, что для большинства используемых на практике полупроводниковых подложек (Si, Ge, GaAs, InSb, CdTe и др.) максимальное значение плотности ионного тока не должно превышать $6 \cdot 10^{13}$ ион/см².с. Ионная бомбардировка с малой плотностью ионного тока практически не сказывается на магнитных характеристиках ТМП. Однако при этом для достижения необходимой дозы необходимо увеличивается время облучения. Поэтому целесообразно ограничить минимальную плотность ионного тока величиной $6 \cdot 10^{12}$ ион/см².с.

Известно, что для кристаллически упорядоченных магнетиков температура Кюри и намагниченность насыщения значительно выше, чем в неупорядоченных или аморфных магнетиках. Поэтому, термический отжиг ионноимплантированных образцов, приводящий к отжигу различных дефектов и упорядочению структуры, ведет к улучшению магнитных характеристик пленок. Для кремния отжиг радиационных дефектов, в зависимости от их сложности происходит в интервале температур от 100 до 700°C в течение 10 мин. Однако как показа-

ли исследования, при высоких температурах (выше 550°C) наряду с отжигом дефектов начинается распад образовавшейся ферромагнитной пленки. Исходя из сказанного, температура отжига для ТМП на основе кремния выбрана $500 \pm 50^{\circ}\text{C}$. Экспериментально определенное минимальное время отжига ТМП при данной температуре составило 10 мин. Увеличение времени отжига не влияло на магнитные характеристики ТМП. Однако исходя из экономии времени отжига и уменьшения трудоемкости процесса, верхний предел установлен равным 30 мин.

П р и м е р. Для получения магнитной пленки на основе железа подложку в виде монокристаллического кремния бомбардируют на ускорителе ИЛУ-3 ионами $^{56}\text{Fe}^{+}$ с энергией $E=40$ кэВ, дозой $D=2,4 \cdot 10^{17} \text{Fe}^{+}/\text{см}^2$, плотностью потока ионов $j=6 \cdot 10^{13} \text{Fe}^{+}/\text{см}^2 \cdot \text{с}$. Температура за счет радиационного нагрева при этом не превышала 80°C . Методами ферромагнитного резонанса, электронографии, электронной микроскопии и дифференциального термомагнитного анализа было подтверждено образование ферромагнитной пленки со следующими основными характеристиками: намагниченность насыщения $4\pi M_{зф} = 4800$ Гс, толщина ТМП $d \approx 50$ нм,

температура Кюри $T_k = 310^{\circ}\text{C}$, толщина защитной пленки $d_{зп} \approx 10$ нм.

После дополнительного термического отжига данного образца при $T_{отж} = 430^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин намагниченность насыщения возросла до $4\pi M_{зф} = 8100$ Гс, температура Кюри увеличилась до $T_k = 530^{\circ}\text{C}$.

Таким образом, используя метод ионной бомбардировки, можно на одной полупроводниковой пластине в едином технологическом цикле сформировать как чисто полупроводниковые, так и магнитные элементы микроэлектроники. Полученные пленки характеризуются повышенной механической прочностью, твердостью и химической стойкостью, а также максимальной адгезией к подложке по сравнению с ТМП, полученным по известному способу (смотри таблицу сравнительных данных). Благодаря специфике образования ТМП - она формируется внутри полупроводника - исключается возможность взаимодействия ее с остаточными газами в камере ускорителя и с внешней окружающей средой в процессе эксплуатации (например, ТМП на основе железа в кремнии выдерживали многочасовое нахождение непосредственно в концентрированных кислотах HCl , H_2SO_4 без изменения своих свойств).

Способы получения ТМП (Fe на Si)	Твердость (по Моссу)	Химическая стойкость	Адгезия к подложке ($10^7 \text{H}/\text{M}^2$)
Прототип	4-5	Окисляется на воздухе, не допускает контакта с кислотами и щелочами	0,3-3
Предлагаемый	7	Не взаимодействует с разбавленными и концентрированными растворами кислот HCl , H_2SO_4 , HNO_3 и разбавленными щелочами	Определяется пределом прочности ТМП 2-50

На основе полученных по данному способу ТМП могут быть созданы различные приборы, например приборы СВЧ в планарных линиях передач (микроскопических, щелевых, компланарных):

фазовращатели, аттенюаторы, СВЧ-ключи и т.п., а также различные магнитные датчики и зонды, работающие в тяжелых химических и механических условиях.