

УДК 621.373

**ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ СИЛИЦИДОВ
МЕТАЛЛОВ МЕТОДАМИ ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО
ПЕРЕНОСА И ОТЖИГА**

В.П. Вейко, В.Ю. Касаткин, В.Н. Матыжонок, А.А. Петров, Е.А. Шахно

Пленки силицидов металлов, являющиеся узкозонными полупроводниками, представляют собой весьма перспективный материал для создания термодатчиков. В работе исследована возможность получения пленочных покрытий из силицидов хрома и железа методами локального лазерного переноса и лазерного отжига. Получены пленочные покрытия силицидов металлов на различных подложках, исследованы их электрические параметры. Определена зависимость свойств пленочных покрытий от условий нанесения.

Ключевые слова: локальный лазерный перенос, лазерный отжиг, пленка, силицид металла, подложка.

Введение

На протяжении последних лет развитие техники шло по пути миниатюризации, усовершенствования и усложнения различных технических устройств. В настоящее время достаточно большую нишу в современной технике заняли разнообразные микроэлектронные устройства, в которых широко используются различные пленочные покрытия. Для создания термодатчиков необходимы пленочные элементы из узкозонных полупроводников. Одними из таких полупроводников являются силициды металлов. Поэтому получение тонкопленочных элементов из этих полупроводников является актуальной задачей [1].

Существует много различных методов получения пленочных покрытий (например, лазерно-плазменное напыление, осаждение из жидкой или газообразной фазы, вакуумное напыление и т.д.). Одним из таких методов является метод локального лазерного переноса [2]. Данный метод имеет ряд достоинств. Он характеризуется своей химической чистотой и простотой, обеспечивает локальность обработки, позволяет непосредственно формировать пленочные покрытия со сложной топологией.

Другим методом получения пленочных покрытий силицидов металлов является метод лазерного отжига поверхности кремния с заранее нанесенной на нее металлической пленкой [3]. В частности, этот метод можно комбинировать с методом локального лазерного переноса, где осаждение металлической пленки производится локальным лазерным переносом, а само пленочное покрытие из силицида металла формируется путем отжига перенесенной пленки.

В настоящей работе была исследована возможность получения полупроводниковых пленочных покрытий силицидов металлов двумя вышеупомянутыми методами.

При использовании метода обратного локального лазерного переноса [4] (рис. 1) мишень располагается за прозрачной акцепторной подложкой. При облучении излучение проходит через прозрачную акцепторную подложку и падает на поверхность донора, расположенного вплотную или на небольшом расстоянии от акцептора. Поверхностные слои донора нагреваются, и часть материала удаляется (в виде твердой, жидкой или газообразной фазы). Далее вещество осаждается на акцепторной подложке.

Достоинством данного метода является возможность использования массивного донора. Однако при использовании метода возможно осаждение пленок только на прозрачные для лазерного излучения подложки.

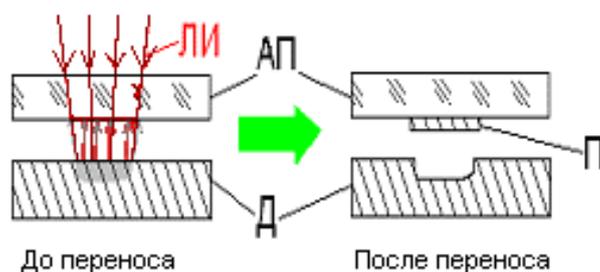


Рис. 1. Схема обратного локального лазерного переноса: ЛИ – лазерное излучение, АП – акцепторная подложка, Д – донор, П – полученная пленка

При использовании метода лазерного отжига (рис. 2) излучение падает на донорную пластину из кремния, на которую нанесена тонкая металлическая пленка. Излучение частично поглощается пленкой, прошедшее через пленку излучение поглощается кремнием. Под действием излучения происходит полное расплавление пленки и проплавление кремниевой пластины на некоторую глубину. Происходит диффузия жидких фаз. После охлаждения на пластине кремния формируется полупроводниковая пленка.

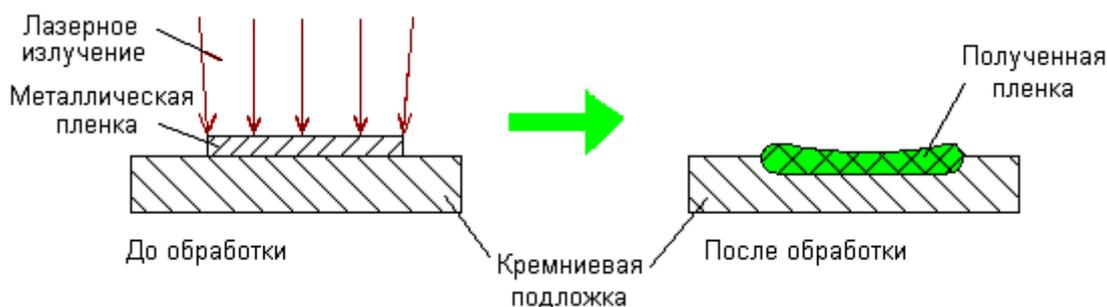


Рис. 2. Схема лазерного отжига

В результате проведения работы были получены пленочные покрытия силицидов металлов методом локального лазерного переноса и методом лазерного отжига при различных параметрах обработки.

Проведено исследование электрических свойств пленочных покрытий из силицидов металлов в зависимости от режимов лазерной обработки. На основе анализа зависимости электрического сопротивления от температуры определялось, полупроводниковая или нет получилась пленка (у собственных полупроводников с уменьшением температуры электрическое сопротивление растет, у металлов оно уменьшается, а у диэлектриков слабо зависит от температуры).

Получение пленок методом локального лазерного переноса и их исследование

В лабораторной установке для локального лазерного переноса, основанной на схеме рис. 1, в качестве рабочего лазера был использован YAG:Nd-лазер, для визуализации луча – вспомогательный He-Ne лазер. Излучение YAG:Nd-лазера фокусировалось в зоне обработки, образец находился в вакуумной камере. Перемещение луча по образцу осуществлялось системой сканирования под управлением компьютера. Для определения мощности излучения часть его отводилась на измеритель мощности ИМО-2М.

Параметры лазерной установки и геометрические характеристики донора и акцептора были следующими: длительность импульса лазерного излучения – 250 нс, длина

волны лазерного излучения – 1,06 мкм, размер пятна в области фокуса – 50 мкм, расстояние между донорной пластиной и акцепторной подложкой – 60 мкм, остаточное давление в вакуумной камере – 0,1 мм рт.ст. Для нанесения пленок использовались донорные пластинки из силицидов железа и хрома, а в качестве акцепторов – подложки из стекла К8 и УС-1. Варьируемыми параметрами при проведении экспериментов являлись мощность лазерного излучения, частота следования импульсов YAG:Nd лазера и скорость сканирования лазерного пучка по поверхности донорной подложки.

Для определения электрических свойств полученных пленок (полупроводниковые они или металлические) образцы охлаждались в жидком азоте, после извлечения определялось изменение их электрического сопротивления с повышением температуры. Значение температуры фиксировалось термопарой, сопротивление – универсальным вольтметром. На рис. 3 представлены наиболее типичные температурные зависимости сопротивлений пленок силицидов железа и хрома, полученных методом локального лазерного переноса в различных режимах работы лазерной установки (мощность излучения P и частота следования импульсов f).

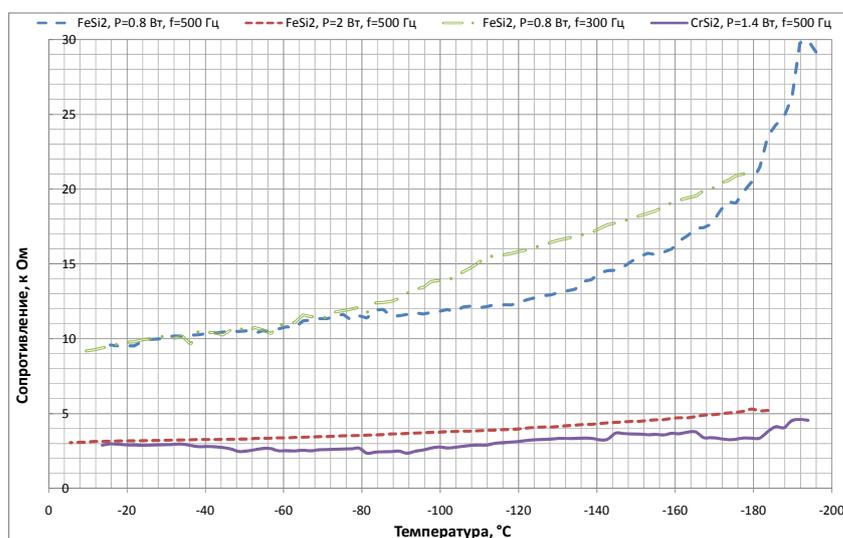


Рис. 3. Зависимость электрического сопротивления пленок, полученных методом локального лазерного переноса, от температуры

Был проведен спектральный анализ некоторых из полученных пленочных покрытий силицидов металлов с использованием спектрофотометра Varian Carry 500 в спектральном диапазоне 300–3000 нм. На основе полученных данных была примерно оценена толщина пленки. Она составила 1 мкм.

На основании анализа профиля поверхности было определено, что средняя толщина данного пленочного покрытия составляет около 1300 нм. При этом стоит обратить внимание, что в некоторых областях по ширине пленки наблюдаются пики, где толщина пленочного покрытия может достигать 4 мкм. Размер этих областей составляет величину порядка 10 мкм.

Измерения профилей поверхностей осуществлялось при помощи силового зондового микроскопа. На рис. 4, а, изображен 2D-профиль поверхности, а на рис. 4, б – одномерный профиль поверхности.

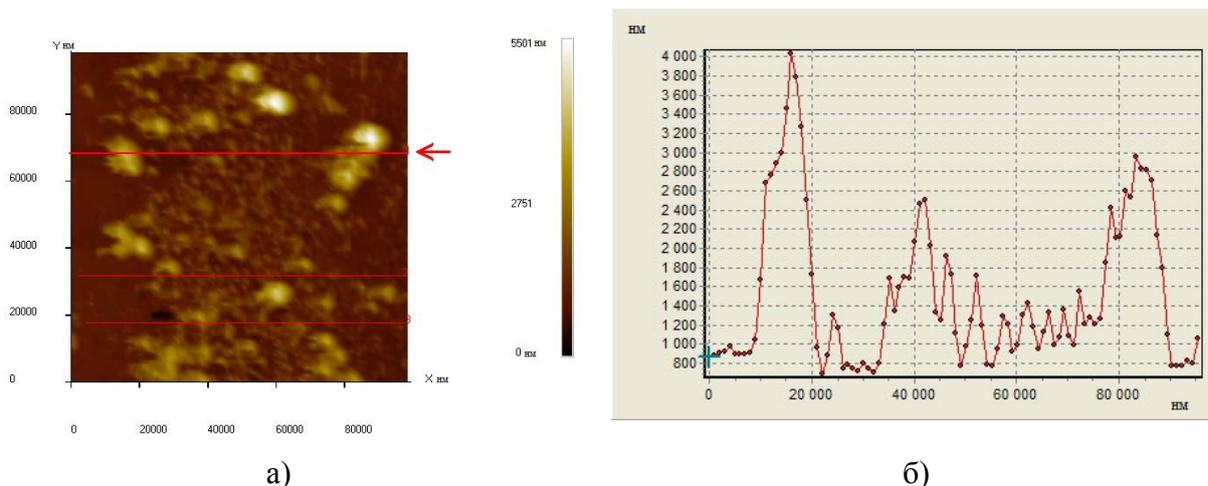


Рис. 4. Профиль поверхности пленки: а) 2D-профиль поверхности; б) одномерный профиль поверхности по линии, помеченной стрелкой

Получение пленок методом лазерного отжига и их исследование

Схема установки аналогична схеме для лазерного переноса, за исключением того, что для отжига в оптический тракт был дополнительно введен френелевский ослабитель для дополнительной возможности изменения мощности на образце. Размер пятна в области фокуса – 60 мкм, остаточное давление в вакуумной камере – 0,1 мм рт.ст.

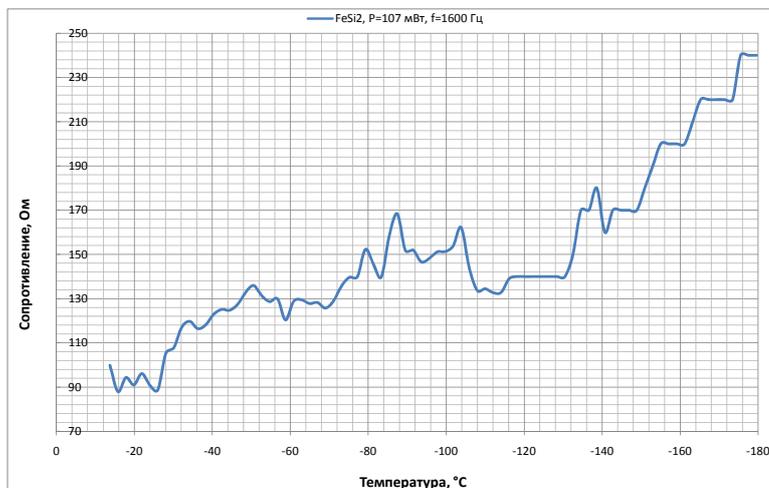


Рис. 5. Зависимость электрического сопротивления пленки, полученной методом лазерного отжига, от температуры

Методика эксперимента состояла в следующем. Пучок лазерного излучения импульсного YAG:Nd лазера, проходя через ослабитель Френеля, фокусировался над поверхностью пленки Fe, заранее нанесенной на кремниевую пластинку методом вакуумного напыления. Одновременное использование френелевского ослабителя и расфокусировка излучения было выбрано для удобства подбора плотности мощности на образце.

це. Под действием лазерного излучения происходило плавление пленки железа, а также приповерхностного слоя кремниевой подложки, на которую эта пленка была нанесена, и смешивание расплавов. После прекращения лазерного воздействия образовавшийся на поверхности расплав из железа и кремния застывал, и образовывался пленочный слой силицида железа.

Для определения средней мощности YAG:Nd лазера во время каждого эксперимента до проведения экспериментов по отжигу была произведена калибровка средней мощности излучения лазера в зависимости от токов накачки при установленном размере светового пятна и оптимальном угле раствора френелевского ослабителя. На основании полученной зависимости можно было определять среднюю мощность излучения в зоне обработки по току накачки.

Методика измерения температурных зависимостей пленочных покрытий из силицидов металлов аналогична той, что была применена для измерения температурных зависимостей сопротивления в случае локального лазерного переноса. На рис. 5 представлена измеренная температурная зависимость сопротивления пленочного покрытия силицида железа на кремниевой подложке, полученного методом отжига.

Обсуждение результатов

Характер температурных зависимостей электрического сопротивления пленок, полученных методом локального лазерного переноса (рис. 3), свидетельствует о том, что полученные пленки – полупроводниковые, так как при повышении температуры сопротивление этих элементов падает. При этом наилучшие результаты получаются при переносе, где в качестве донора используется силицид железа.

Если качественно сравнить форму кривой зависимости электрического сопротивления от температуры для пластинки из FeSi_2 с кривыми, описывающими эту зависимость для пленок из FeSi_2 , то можно сделать вывод, что температурные зависимости полученных пленок из силицида железа качественно дублируют вид зависимости для массивного образца из силицида железа. Это говорит о возможности сохранения свойств данного полупроводникового материала при переносе. Однако здесь следует обратить внимание на то, что пластинка FeSi_2 имеет полупроводниковую зависимость при температурах ниже 50°C . При более высоких температурах сопротивление пластинки начинает расти с увеличением температуры. Такое изменение зависимости электрического сопротивления от температуры, скорее всего, связано со структурно-фазовыми переходами. В случае же пленок силицида железа, полученных как локальным лазерным переносом, так и методом отжига, температурная зависимость электрического сопротивления от температуры сохраняет свой полупроводниковый характер на протяжении всего исследуемого интервала температур.

При подробном рассмотрении характеристик электрического сопротивления для пленок из силицидов железа можно сделать выводы о том, как зависят электрические свойства полученных покрытий от режимов их нанесения. В частности, видно, что повышение мощности (или плотности мощности) примерно в 2,5 раза приводит не только к существенному уменьшению диапазона изменения сопротивлений, но и к уменьшению сопротивления пленочного покрытия в принципе. К тому же изменение сопротивления при росте температуры становится менее резким. Это, скорее всего, связано с тем, что в данном случае при заданных скорости сканирования лазерного пятна по поверхности донора и частоте следования импульсов лазерного излучения увеличение плотности мощности приводит к существенному увеличению толщины пленочного покрытия. В свою очередь, изменение частоты следования импульсов (т.е. незначительное изменение коэффициента перекрытия) при заданных плотности мощности и скоро-

сти сканирования не привело к существенному изменению вида зависимостей электрического сопротивления от температуры. Отличие хода этих зависимостей при температурах ниже -150°C , очевидно, связано с погрешностью измерений.

В случае переноса силицида хрома методом локального лазерного переноса зависимость получается очень неровной. К тому же при низких температурах данное пленочное покрытие обладает полупроводниковой температурной зависимостью сопротивления, а по мере температурного роста вследствие структурного перехода зависимость электрического сопротивления от температуры становится возрастающей.

Что касается получения силицида железа методом отжига, то из рис. 5 видно, что полученное покрытие также обладает полупроводниковыми свойствами. Относительно низкое сопротивление этого покрытия говорит о том, что оно обладает большей толщиной, чем пленочные покрытия, нанесенные при помощи метода локального лазерного переноса. Также наблюдается тенденция к сохранению формы температурной зависимости, такой же, как и в случае массивной пластинки силицида железа.

Исследование профиля поверхности пленки, полученной методом локального лазерного переноса, позволило заключить, что толщина полученных пленочных элементов составляет около 1 мкм. Для дальнейшего возможного использования такие пленки рекомендуется подвергать дополнительной обработке для удаления отдельных пиков.

Заключение

Проведенные исследования показали, что как методом локального лазерного переноса, так и методом лазерного отжига можно получить пленочные элементы из силицидов металлов, обладающие температурными зависимостями сопротивлений, характерными для полупроводников. Температурные зависимости полученных пленок из силицида железа качественно дублируют вид зависимости для массивного образца из силицида железа, что говорит о возможности сохранения электрических свойств данного полупроводникового материала при переносе. Была замечена существенная зависимость электрических свойств полученных пленочных элементов от плотности мощности лазерного излучения, при которой эти пленочные элементы были нанесены, что, в свою очередь, связано с сильной зависимостью свойств пленок от их толщины.

Наиболее хорошие результаты были получены для пленок FeSi_2 , из чего можно сделать вывод, что используемые режимы нанесения вполне пригодны для получения полупроводниковых пленочных элементов из этого материала.

Пленочные покрытия, полученные методом лазерного отжига, оказываются существенно толще, чем покрытия, нанесенные методом локального переноса, поэтому этот метод целесообразно использовать для получения толстых пленок.

Литература

1. Piqué A., Chrisey D.B., Auyeung R.C.V. et al. A novel laser transfer process for direct writing of electronic and sensor materials // *Applied Physics A*. – 1999. – V. 69. – № 6.
2. Вейко В.П., Шахно Е.А. Абляция и конденсация вещества при локальном лазерном переносе пленок // *Оптический журнал*. – 2000. – Т. 67. – № 4. – С. 104–111.
3. Вейко В.П., Метев С.М. Лазерные технологии в микроэлектронике. – София: Издательство Болгарской Академии наук, 1991. – 363 с.
4. Вейко В.П., Шахно Е.А. Лазерная абляция и конденсация в условиях малого расстояния между мишенью и подложкой // *Известия Академии наук*. – 1997. – Т. 61. – № 7. – С. 1367–1374.

- Вейко Вадим Павлович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, veiko@lastech.ifmo.ru
- Касаткин Василий Юрьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kas_vasya@mail.ru
- Матыжонок Виктор Николаевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистрант, VictoorM@GMail.com
- Петров Андрей Анатольевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, aa_petrov@lastech.ifmo.ru
- Шахно Елена Аркадьевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, shakhno@lastech.ifmo.ru