

УДК 538.9

DOI: 10.31040/2222-8349-2021-0-4-30-34

**ВЛИЯНИЕ ПАССИВИРУЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА СТРУКТУРУ  
АЛЮМИНИЕВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА КРЕМНИИ****© М.В. Потапова, М.Ю. Махмуд-Ахунов, В.Н. Голованов,  
К.Е. Имешев, А.А. Адамович**

Важную роль в производстве полупроводниковых приборов играет качество поверхности металлизированных контактных площадок на кристалле. В данной работе представлены экспериментальные исследования влияния защитной пассивирующей пленки оксида кремния на структуру поверхности алюминиевой металлизации в области формирования контактных площадок. На подготовленные образцы кремния с алюминиевой металлизацией проводилось плазмохимическое осаждение пассивирующего слоя  $\text{SiO}_2$  из газовой фазы (PECVD метод) с использованием высокочастотного источника питания с частотой 13.56 МГц. После этого проводилось химическое травление осажденного оксида кремния для имитации процесса формирования контактных площадок кристаллов полупроводниковых приборов.

Устойчивость поверхности металлизации к воздействию плазменных процессов исследовалась методом растровой электронной микроскопии. Показано, что в результате проведенного технологического цикла происходит генерация дефектов типа дислокаций в наносимой пленке Al. Обнаружено, что природа наблюдаемых дефектов носит различный характер. Выявленные крупные (размером  $\sim 1$  мкм) ямки травления квадратной формы в местах выхода дислокаций на поверхность носят единичный характер и появляются независимо от процессов нанесения пассивирующего покрытия что определяется ориентирующим действием монокристаллической подложки, обладающей некоторой малой плотностью дислокаций. В то время как второй тип дефектов, показанный наличием ямок травления размером  $\sim 100\text{--}300$  нм, отличается большей поверхностной плотностью. Причем исключение процесса пассивации оксидом кремния не привело к появлению этого типа дефектов, что и определило их природу, связанную с ионной бомбардировкой слоя Al в процессе плазмохимического осаждения оксида кремния из газовой фазы. Показано также, что особенностью этого типа дефектов является их разориентировка как относительно первого типа дефектов, так и друг относительно друга.

Выявление структуры слоев металлизации проводилось методом рентгеновской дифракции, по результатам которой показана поликристалличность формируемой алюминиевой металлизации. Причем преимущественная ориентация алюминиевой пленки соответствует подложке Si (111).

Ключевые слова: кремний, алюминий, пассивация, металлизация, плазмохимическое осаждение, дефекты.

**Введение.** В современной микроэлектронике кремний остается основным материалом, используемым при производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (ИМС). В качестве универсального диэлектрика широким спектром применения обладает оксид кремния –  $\text{SiO}_2$ . Например, как подзатворный диэлектрик в полевых или МОП-транзисторах в качестве изоляции элементов ИМС, а также пассивирующих или защитных покрытий и др. [1].

Существует несколько способов получения пленок оксида кремния для формирования подзатворного и маскирующего изолирующего слоя. Наиболее эффективен и распространен метод получения пленок  $\text{SiO}_2$  путем термического окисления [2]. Более сложными в реализации являются методы плазмохимического осаждения и реактивного распыления [3, 4].

Наиболее стандартным процессом металлизации является вакуумное напыление алюминия. Выбор материала металлизации, а также ее

ПОТАПОВА Марина Владимировна, АО «НПП «Завод Искра», e-mail: Marinka8d@mail.ru  
МАХМУД-АХУНОВ Марат Юсупович – к.ф.-м.н., Ульяновский государственный университет,  
e-mail: maratmau@mail.ru

ГОЛОВАНОВ Виктор Николаевич – д.ф.-м.н., Ульяновский государственный университет,  
e-mail: golovanov\_vn@mail.ru

ИМЕШЕВ Кирилл Евгеньевич, АО «НПП «Завод Искра», e-mail: komunist1987@mail.ru

АДАМОВИЧ Артем Александрович, Ульяновский государственный университет,  
e-mail: artem.adamovich@bk.ru

стабильность при дальнейших технологических операциях производства полупроводниковых приборов может оказывать существенную роль на их устойчивость [5].

Основными требованиями, предъявляемыми к металлизации, является высокая адгезия к подложке, обеспечивающая пайку высокотемпературными припоями в вакууме.

#### Описание экспериментальной части.

Поведение Al металлизации с пассивирующей пленкой SiO<sub>2</sub> исследовалось на пластинах p-Si (111) диаметром Ø76 mm. На Si образцы наносился слой Al металлизации толщиной  $h = 1.0$  мкм на установке вакуумного напыления металлов «УВНМ Оратория 29М». Металлизация подвергалась термообработке на операции «Вжигание Al» при  $T = 430^\circ\text{C}$  в течение  $t = 30$  мин. Затем проводилось плазменно-химическое осаждение пассивирующей пленки двуокиси кремния из газовой фазы на установке «Caroline PECVD15» при температуре  $T = 22^\circ\text{C}$ , с частотой генератора 13.56 МГц. После чего полученный слой оксида кремния полностью удалялся травлением в буферном травителе с добавлением глицерина [6]. Далее образцы промывались в трехкаскадной ванне с деионизованной H<sub>2</sub>O и сушились методом центрифугирования.

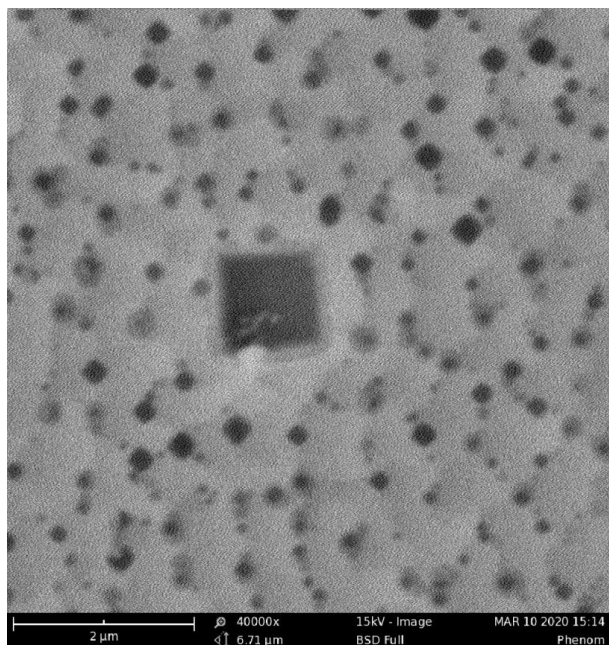


Рис. 1. РЭМ снимки поверхности Al металлизации после удаления пассивации, нанесенной на установке «Caroline PECVD15»

Для анализа топологии металлизации и слоя пассивации использовался метод растровой электронной микроскопии (PHENOM PRO-X). Выявление структуры формируемых слоев проводилось методом рентгеновской дифракции (D2 PHASER).

**Экспериментальные результаты и их обсуждение.** Типичные снимки поверхности Al металлизации на монокристаллических пластинах p-Si после удаления пассивации, нанесенной на установке «Caroline PECVD15», представлены на рис. 1.

Видно, что поверхность покрыта множеством ямок травления, имеющих четкую огранку. Наблюдаемые углубления представлены двумя типами ямок: размером  $\sim 1.0$  мкм и  $\sim 100\text{--}300$  нм. Дефекты, имеющие больший размер, носят единичный характер и имеют плотность порядка  $N_1 \sim 5 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>-2</sup>. Поверхностная концентрация наблюдаемых дефектов меньшего размера  $N_2 \sim 1 \div 1.5$  мкм<sup>-2</sup>. Появление первого типа дефектов, отличающегося большими размерами и меньшей плотностью, вероятно, связано с ориентирующим действием монокристаллической подложки Si с некоторой плотностью дислокаций. Действительно, присутствующие в подложке несовершенства, а именно дислокации, могут прорасти в наносимый слой, в данном случае металлизацию, например, как это наблюдается при формировании эпитаксиальных пленок [7].

Второй тип ямок травления, очевидно, связывается с дефектностью слоя металлизации. Генерация дефектов в данном случае происходит за счет ионной бомбардировки слоя Al в процессе плазменно-химического осаждения оксида кремния из газовой фазы (метод PECVD). Действительно, протекание процесса осаждения сопровождается образованием в плазме радикалов и ионов за счет поступающих в камеру реакционных газов. Ускоряемые электрическим полем ионы газов приобретают необходимую энергию и взаимодействуют с подложкой. Имеющиеся в плазме ионы могут обладать энергией несколько сотен эВ и, бомбардируя подложку, создавать дефекты на ее поверхности. Внедрение ионов в материалы сопровождается изменением структуры и свойств в результате образования многочисленных дефектов. Типичная величина пороговой энергии, которую необходимо передать атому, чтобы он перешел в междоузлие и воз-

ник дефект, имеет порядок  $\sim 3\text{--}5$  эВ. В то время как энергия ионизации кислорода составляет 12.6 эВ. Это является достаточным для генерации более сложных дефектов типа дислокаций в алюминиевой металлизации.

Наблюдаемые после селективного удаления слоя пассивации ямки травления правильной формы говорят о кристалличности формируемой пленки Al. Подтверждением сказанному служат данные рентгеновской дифракции. Видно (рис. 2), что на дифрактограмме присутствует пик, определяемый монокристаллической подложкой кремния, остальные пики отвечают за алюминиевую металлизацию. Очевидно, кристалличность пленки Al определяется ориентирующим действием монокристаллической Si подложки. Однако нарушение температурного режима и высокие скорости нанесения металлизации могут затруднять послойный рост монокристаллической пленки Al и это неизбежно приведет к возникновению дефектов и образованию зернистой структуры.

Для исключения влияния процесса плазмохимического нанесения пассивирующего слоя на структуру металлизации, часть образцов после операции вжигания Al металлизации, в отсутствие пассивирующего оксида, травилась в селективном травителе для оксидной пассивации. Было обнаружено (рис. 3) лишь наличие крупных ямок травления. Очевидно, в данном случае не происходит генерации дефектов в Al металлизации за счет воздействия плазмы, а ямки возникают лишь в

местах выхода дислокаций кремниевой подложки [8].

**Закключение.** Таким образом, при формировании контактных площадок на кристаллах полупроводниковых транзисторов в защитном окисле, важную роль играет процесс нанесения пассивирующего покрытия. Как было показано, под воздействием плазмы при осаждении оксида кремния методом PECVD происходит генерация дефектов в поверхностном слое алюминиевой контактной площадки. Образование подобного рода нежелательных дефектов может приводить к неуправляемому изменению электрических свойств транзисторов, проникновению паров воды и ионов щелочных металлов. Как в поле механических напряжений, возникающих в процессах сборочных операций, так и в электромагнитном поле, при проведении электрических испытаний транзисторов, подвижность точечных дефектов резко увеличивается. В результате чего в дефектной структуре происходит формирование макроскопических дефектов, наличие которых в полупроводниковых приборах резко ухудшает их характеристики. Наблюдаемые после плазмохимического нанесения пассивации линейные дефекты в алюминиевой металлизации носят поверхностный характер, поэтому учет фактора воздействия ВЧ плазмы на характеристики полупроводниковых приборов необходим лишь при малых толщинах металлизации.

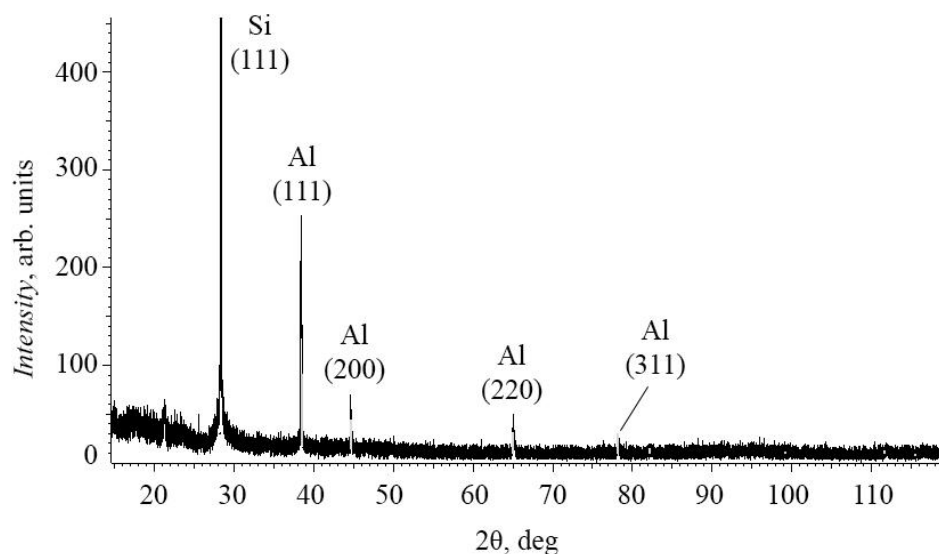


Рис. 2. Дифрактограмма Al металлизации на *p*-Si после операций вжигания, пассивации и селективного травления

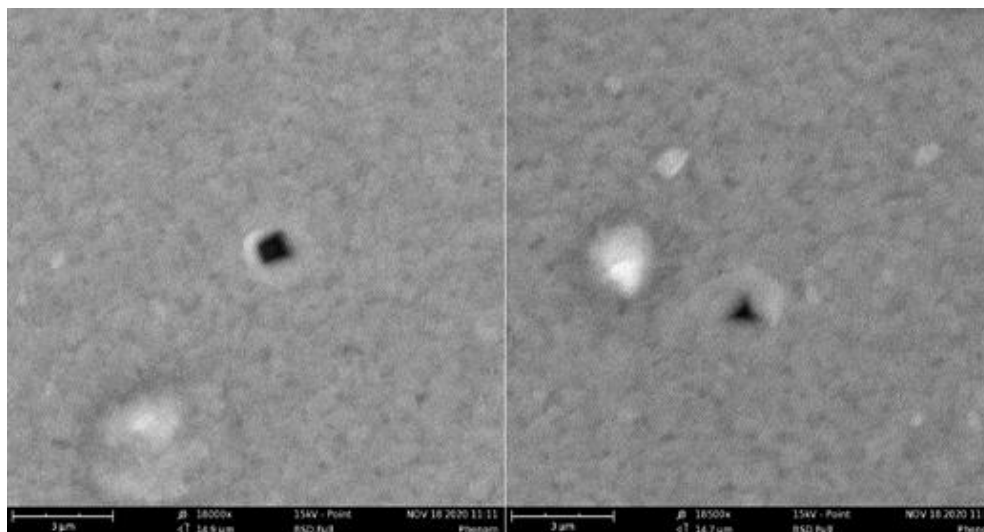


Рис. 3. Снимки поверхности Al металлизации на поверхности p-Si без нанесения оксидной пассивации после травления в селективном травителе

### Литература

1. Некрашевич С.С., Гриценко В.А. Электронная структура оксида кремния (Обзор) // Физика твердого тела. 2014. Т. 56, № 2. С. 209.
2. Малаев И.М., Шангереева Б.А. Окисление легированных и нелегированных пленок поликристаллического кремния путем химического осаждения из парогазовых смесей // Фундаментальные научные основы современных комплексных методов исследований и испытаний материалов, а также элементов конструкций: Сборник материалов молодежной конференции. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2015. С. 21.
3. Sekine M. Study for plasma etching of dielectric film in semiconductor device manufacturing. Review of ASET research project // Pure Appl. Chem. 2002. Vol. 74, № 3. P. 381–395.
4. Ключева В.А. Обзор методов нанесения кремниевых покрытий // Молодой ученый. 2016. Т. 10, № 114. С. 236–246.
5. Мустафаев Г.А., Мустафаев А.Г., Черкесова-Калинина Н.В. Надежность интегральных микросхем с алюминиевой металлизацией // Электроника и электротехника. 2017. Т. 3. С. 1–6.
6. Gablech I., Brodský J., Pekárek J., Neuzil P. Infinite Selectivity of Wet SiO<sub>2</sub> Etching in Respect to Al // Micromachines. 2020. Vol. 11, № 4. P. 365–371.
7. Park J.-S., Tang M., Chen S., Liu H., Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon // Crystals. 2020. Vol. 10(12), № 1163.
8. Труханов Е.М. Свойства дислокаций несоответствия и псевдодислокаций, не типичные для дефектов однородных кристаллов // Поверхность. 2010. № 1. С. 43–51.

### References

1. Nekrashevich S.S., Gritsenko V.A. Elektronnaya struktura oksida kremniya (Obzor) // Fizika tverdogo tela, 2014, vol. 56, no. 2, 209 p.
2. Malayev I.M., Shangereyeva B. A. Okisleniye legirovannykh i nelegirovannykh plenok polikristallicheskogo kremniya putem khimicheskogo osazhdeniya iz parogazovykh smesey // Fundamental'nyye nauchnyye osnovy sovremennykh kompleksnykh metodov issledovaniy i ispytaniy materialov, a takzhe elementov konstruksiy: Sbornik materialov molodezhnoy konferentsii, Moskva: Vserossiyskiy nauchno-issledovatel'skiy institut aviatsionnykh materialov, 2015, 21 p.
3. Sekine M. Study for plasma etching of dielectric film in semiconductor device manufacturing. Review of ASET research project // Pure Appl. Chem., 2002, vol. 74, no. 3, pp. 381-395.
4. Klyuyeva V.A. Obzor metodov naneseniya kremniyevykh pokrytiy // Molodoy uchenyy, 2016, vol. 10, no. 114, pp. 236-246.
5. Mustafayev G.A., Mustafayev A.G., Cherkeseva-Kalinina N.V. Nadezhnost' integral'nykh mikroskhem s alyuminiyevoy metallizatsiyey // Elektronika i elektrotekhniká, 2017, vol. 3, pp. 1-6.
6. Gablech I., Brodský J., Pekárek J., Neuzil P. Infinite Selectivity of Wet SiO<sub>2</sub> Etching in Respect to Al // Micromachines, 2020, vol. 11, no. 4, pp 365-371.
7. Park J.-S., Tang M., Chen S., Liu H., Heteroepitaxial Growth of III-V Semiconductors on Silicon // Crystals, 2020, vol. 10(12), no. 1163.
8. Trukhanov Ye.M. Svoystva dislokatsiy nesootvetstviya i psevdodislokatsiy, ne tipichnyye dlya defektov odnorodnykh kristallov // Poverkhnost', 2010, no. 1, pp. 43-51.

---

  
**EFFECT OF PASSIVATING COATINGS ON METALLIZATION TOPOLOGY  
IN PRODUCTION OF SEMICONDUCTOR DEVICES**

© M.V. Potapova<sup>1</sup>, M.Yu. Makhmud-Akhunov<sup>2</sup>, V.N. Golovanov<sup>2</sup>,  
K.E. Imeshev<sup>1</sup>, A.A. Adamovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research and Production Enterprise «Zavod Iskra»,  
42, ulitsa Lev Tolstoy, 432017, Ulyanovsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Ulyanovsk State University,  
42, ulitsa Lev Tolstoy, 432017, Ulyanovsk, Russian Federation

The surface quality of the metallized contact pads on the crystal plays an important role in the production of semiconductor devices. This paper presents experimental studies of the effect of a protective passivation film of silicon oxide on the surface structure of aluminum metallization in the field of forming contact pads. Plasma chemical deposition of passivation layer SiO<sub>2</sub> from gas phase (PECVD method) was carried out on prepared samples of silicon with aluminum metallization using a high-frequency power source with a frequency of 13.56 MHz. After that, chemical etching of precipitated silicon oxide was carried out to simulate the process of forming contact areas of semiconductor device crystals.

The resistance of the metallization surface to plasma processes was studied by raster electron microscopy. It is shown that as a result of the process cycle, defects of the dislocation type are generated in the applied film Al. The nature of the observed defects has been found to be different. The revealed large square-shaped pits with a size of ~ 1 μm at the places where dislocations come to the surface are of a single nature and appear independently of the processes of applying passivation coatings, which is determined by the orienting action of a single-crystal substrate having some low dislocation density. While the second type of defects, shown by the presence of etching pits measuring ~ 100–300 nm, is characterized by a higher surface density. Moreover, the exclusion of the passivation process with silicon oxide did not lead to the appearance of this type of defects, which determined their nature associated with the ion bombardment of the Al layer during the plasma chemical deposition of silicon oxide from the gas phase. It is also shown that a feature of this type of defects is their disorientation both with respect to the first type of defects and with respect to each other.

Detection of the structure of the metallization layers was carried out by X-ray diffraction, the results of which show the polycrystallinity of the formed aluminum metallization. The preferred orientation of the aluminum film corresponds to the substrate Si (111).

Key words: silicon, aluminium, passivation, metallization, plasma chemical deposition, defects.