

УДК 621.382

## РЕЖИМЫ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ СИСТЕМЫ Pt-Si ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ СИЛИЦИДА ПЛАТИНЫ

В.А. СОЛОДУХА, В.А. ПИЛИПЕНКО, В.А. ГОРУШКО

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 28 сентября 2018

**Аннотация.** Проведена оценка допустимой неравномерности облучения и разброса температуры по площади пластины при быстрой термической обработке, не вызывающих в ней возникновения термических напряжений, приводящих к пластическому течению или разрушению кремния. Показано, что формирование силицида платины при  $T \leq 810$  °C не вызывает отрицательных явлений в кремнии и его необходимо проводить в среде азота, напуск которого в герметичную камеру осуществляется после создания в ней вакуума  $10^{-2}$  мм рт. ст.

**Ключевые слова:** интегральная микросхема, быстрая термообработка, силицид платины, термические напряжения.

**Abstract.** Assessment is performed of the permissible nonuniformity of irradiation and temperature scatter as per the wafer area during the rapid thermal treatment, not causing the thermal stresses in it, resultant in the plastic melting or silicon disruption. It was shown, that formation of platinum silicide at  $T \leq 810$  °C does not cause the negative phenomena in silicon, and it should be performed in the nitrogen environment, whose flooding into the the sealed chamber is done after creation in it of vacuum of  $10^{-2}$  mm, mercury column.

**Keywords:** intergrated circuit, rapid thermal treatment, platinum silicide, thermal stresses.

**Doklady BGUIR. 2018, Vol. 118, No. 8, pp. 88-92**  
**Rapid thermal treatment modes of the Pt-Si system**  
**for formation of platinum silicide**  
**V.A. Solodukha, V.A. Pilipenko, V.A. Gorushko**

### Введение

Основной тенденцией развития современной микроэлектроники является уменьшение топологических норм проектирования интегральных микросхем. Это требует внедрения в технологию их изготовления новых технологических процессов и материалов. Одним из наиболее перспективных материалов в современной микроэлектронике являются силициды различных металлов. Обладая высокой стабильностью, термической устойчивостью, хорошей адгезией к поверхности кремния, они образуют тесный контакт металл-полупроводник с кремнием, обеспечивая высокую стабильность электрических характеристик изготавливаемых приборов.

Основным методом их формирования является твердофазный синтез за счет взаимодействия кремния с соответствующей пленкой металла при температурах от 400 до 1000 °C в инертной атмосфере в течение 10–60 мин. [1]. Температура, время и среда являются определяющими факторами в формировании фазового состава, кристаллической решетки, размера зерна, механических и электрических параметров получаемого силицида. В этом плане ключевую роль в диффузионном синтезе силицидов после нанесения пленки металла выполняет термообработка. Использование высоких температур и длительностей в данном процессе приводит к существенному изменению микрорельефа границы раздела силицид-

кремний и, кроме того, сопровождается нежелательными диффузионными процессами в уже сформированных ионно-легированных слоях, образованием и ростом структурных нарушений, механических и термических напряжений. Это приводит к необходимости разработки новых технологических процессов, использующих либо низкие температуры, либо короткие времена термической обработки. Одним из возможных путей реализации такого подхода является импульсный фотонный отжиг с использованием некогерентного светового излучения секундной длительности.

### Расчет допустимой неравномерности облучения и нагрева пластин кремния при быстрой термической обработке

Одним из требований к процессу быстрой термообработки (БТО) является равномерность нагрева поверхности кремниевой пластины. В противном случае возможно возникновение радиального градиента температуры, который вызывает такие отрицательные эффекты, как генерация термических напряжений, приводящих к изгибу пластин или их релаксации в виде дислокаций, дислокационных петель, линий скольжения. При возникновении термических напряжений, превышающих критическое значение 50–80 МПа при нагреве пластин до  $T \geq 900\text{--}950\text{ }^\circ\text{C}$ , в них начинается процесс пластического течения кремния. При более низких температурах имеет место упругая деформация, которая при напряжениях выше 100 МПа приводит к разрушению кремниевых пластин и образованию различных структурных дефектов в кремнии, что недопустимо при создании различных типов полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

В связи с этим проводилась оценка допустимой неравномерности облучения кремниевой пластины световым потоком ( $\delta_0$ ) и определялся допустимый разброс температуры ( $\delta_T$ ) по ее площади, который не вызывает в ней пластического течения или ее разрушения.

Расчет термических напряжений, возникающих за счет разброса температуры по площади пластины, проводился на основании выражения [2]

$$\sigma_r = E_{\text{ю}}(1 - \mu_n)^{-1} r \alpha_T dT/dr, \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  – термические напряжения в кремниевой пластине, возникающие за счет разброса температуры по площади пластины;  $E_{\text{ю}}$  – модуль Юнга кремния;  $\mu_n$  – коэффициент Пуассона кремния;  $r$  – радиус кремниевой пластины;  $\alpha_T$  – температурный коэффициент линейного расширения кремния;  $dT/dr$  – радиальный разброс температуры по площади пластины.

Данный расчет позволил установить (рис. 1), что разрушение пластины кремния наступает при разбросе температуры по ее площади  $96\text{ }^\circ\text{C}$ , а его пластическое течение – при  $76\text{ }^\circ\text{C}$ .

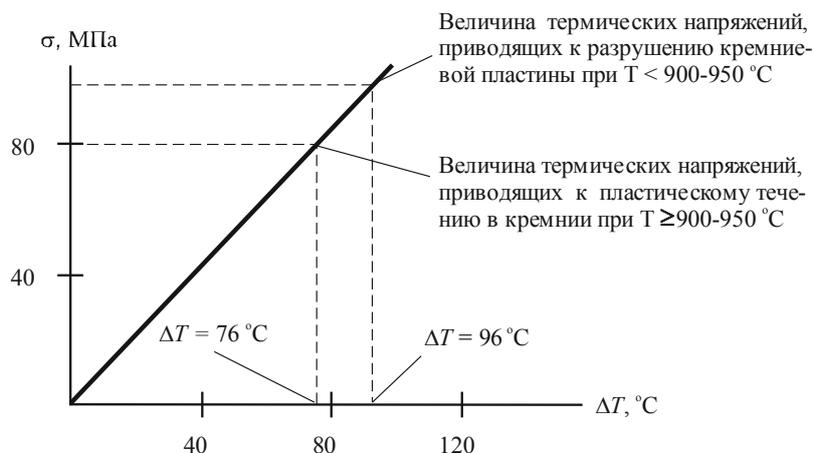


Рис. 1. Зависимость термических напряжений в кремниевой пластине от разброса температуры по площади пластины

Оценим допустимую неравномерность облучения кремниевой пластины по ее площади, при которой возникающий разброс температуры  $\delta_T$  не приводит к возникновению пластического течения в кремнии или его разрушению.

Процесс нагрева кремниевой пластины при облучении импульсами секундной длительности описывается известным уравнением теплопроводности [3]

$$\rho ch \, dT/dt = (1 - R)E_{m0} - 2\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность кремния;  $c$  – теплоемкость кремния;  $h$  – толщина кремниевой пластины;  $E_{m0}$  – плотность мощности светового потока, падающего на пластину;  $\varepsilon_{с.ч.}$  – степень черноты кремния, равная 0,48;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  – температура кремниевой пластины;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $R$  – отражательная способность кремния;  $t$  – время нагрева,

Решая уравнение (1) с начальным условием

$$T = T_0 \text{ при } t = 0 \quad (3)$$

и граничными условиями

$$\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T_{x=h}^4 - T_0^4) = 0, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T_{x=0}^4 - T_0^4) - (1 - R)E_{m0} = 0, \quad (5)$$

определим максимальную температуру (в точке экстремума  $dT/dt = 0$ ) при нагреве пластин до температуры 500 °С и выше, т. е. когда выполняется условие  $T^4 \gg T_0^4$

$$T_{\max} = [(1 - R)E_{m0} / 2\varepsilon_{с.ч.}\sigma]^{1/4}. \quad (6)$$

Представляя выражение (6) в виде

$$E_{m0} = \beta T^4, \quad (7)$$

где  $\beta = 2\varepsilon_{с.ч.}\sigma(1 - R)^{-1}$ ,

можно записать:

$$E_{m0 \max} = \beta T_{\max}^4, \quad (8)$$

$$E_{m0 \min} = \beta T_{\min}^4. \quad (9)$$

Поскольку неравномерность облучения  $\delta_0$  равна

$$\delta_0 = E_{m0 \max}^{-1} (E_{m0 \max} - E_{m0 \min}), \quad (10)$$

а разброс температуры по пластине

$$\delta_T = T_{\max}^{-1} (T_{\max} - T_{\min}), \quad (11)$$

то выражение (10) можно записать в виде

$$\delta_0 = 1 - E_{m0 \max}^{-1} E_{m0 \min} = - (T_{\min}/T_{\max})^4. \quad (12)$$

Учитывая, что

$$T_{\min} T_{\max}^{-1} = 1 - \delta_T, \quad (13)$$

неравномерность облучения будет равна

$$\delta_0 = 1 - (1 - \delta_T)^4. \quad (14)$$

Поскольку допустимый разброс температуры по площади пластины составляет 7,6 % (76 °С при  $T = 1000$  °С), то допустимая неравномерность облучения световым потоком не должна превышать 27,1 %.

Следует отметить, что равномерность облучения пластины световым потоком определяется как количеством используемых ламп, так и геометрией рабочей камеры. При этом необходимо учитывать излучение, получаемое как от самих источников, так и формируемое мнимыми и действительными их изображениями, образуемыми зеркальными стенками камеры. В работе [4] показано, что при оптимальной конструкции камеры можно достичь неравномерности светового потока порядка 2,8 %, что в 9,7 раза меньше допустимой величины, обеспечивая при этом разброс температуры по площади

пластины менее 0,01 % для пластин диаметром 100 мм. Это разброс не зависит от времени облучения и совпадает с неравномерностью светового потока.

### **Обоснование среды формирования силицида платины при быстрой термической обработке**

Важным моментом при формировании силицида платины является выбор среды, в которой проводится обработка пленки платины. Поскольку быстрая термообработка осуществляется в естественных атмосферных условиях при температуре 360–810 °С в присутствии атмосферного кислорода, то это может приводить к окислению кремния, продифундировавшего в моносилицид платины, с образованием двуокиси кремния на его поверхности. Если в окружающей среде имеется достаточно кислорода, то возможно образование смешанного слоя, состоящего из PtSi и SiO<sub>2</sub>. Кроме того, на поверхности его может формироваться слой, обогащенный платиной. Это приводит к значительному увеличению микрорельефа поверхности формируемого моносилицида платины, что будет отрицательно сказываться на его контакте с последующими слоями разводки интегральной микросхемы. Наличие кислорода при обработке приводит также к снижению скорости роста силицидов и их адгезии к подложке [5]. Поскольку для проведения процесса БТО используются импульсы светового излучения, то нельзя исключать их влияния на процесс окисления кремния при температурах нагрева до 550 °С. Это, возможно, обусловлено установленным ранее фактором влияния фотонного потока на скорость окисления кремния, связанного с образованием отрицательных ионов кислорода за счет туннелирования и термоэлектронной эмиссии электронов с поверхностных слоев кремния при температурах 1000 °С и выше [6]. Поскольку используемые температуры нагрева при твердофазном синтезе моносилицида платины значительно ниже, и термоэлектронную эмиссию электронов с поверхности кремния можно не учитывать, то процесс туннелирования при этом может иметь место. В этой связи можно ожидать ускоренного роста двуокиси кремния на PtSi за счет взаимодействия кислорода с кремнием, продифундирующим в моносилицид платины, при его твердофазном синтезе с применением импульсной фотонной обработки системы Pt-Si.

Из литературных данных следует, что для исключения процесса окисления наиболее приемлемой атмосферой для проведения формирования силицида платины методом быстрой термообработки является азот. С этой целью в камере отжига перед обработкой создавался вакуум 10<sup>-2</sup> мм рт. ст. и для предотвращения наличия в ней остатков кислорода проводилась продувка азотом. Далее в камере повторно создавался вакуум 10<sup>-2</sup> мм рт. ст. с последующим напуском азота при избыточном давлении и проводилась ее герметизация. Это обеспечивало отсутствие следов двуокиси кремния на поверхности PtSi после завершения процесса быстрой термообработки системы Pt-Si.

### **Заключение**

Для формирования силицида платины на кремнии методом БТО, без возникновения в кремнии термических напряжений, а также для исключения процесса окисления кремния, продифундировавшего на поверхность пленки платины, ее необходимо проводить в герметичной камере, обеспечивающей разброс температуры по площади пластины не более 0,01 % в атмосфере азота, напуск которого в камеру осуществляется после создания в ней вакуума 10<sup>-2</sup> мм рт. ст.

### **Список литературы**

1. Мьюрарка Ш.П. Силициды для СБИС. М.: Мир, 1986. 176 с.
2. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с
3. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС. Минск: Изд. центр БГУ, 2004. 531 с.
4. Оценка равномерности облучения полупроводниковых пластин в камере установки БТО / В.А. Пилипенко [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2015. № 1. С. 34–37.
5. Структурно-морфологические особенности границы раздела Si/PtSi в диодах Шоттки для силовых

- микроэлектроники / А.С. Турцевич [и др.] // Вакуумная техника и технология. Т.16, № 4. С. 271–275.
6. Модель термического окисления кремния при быстрой термической обработке / В.А. Пилипенко [и др.] // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2006. № 2. С. 35–39.

### References

1. M'jurarka Sh.P. Silicidy dlja SBIS. M.: Mir, 1986. 176 s. (in Russ.)
2. Koncevoj Ju.A., Litvinov Ju.M., Fattahov Je.A. Plastichnost' i prochnost' poluprovodnikovyh materialov I struktur. M.: Radio i svjaz', 1982. 240 s. (in Russ.)
3. Pilipenko V.A. Bystrye termoobrabotki v tehnologii SBIS. Minsk: Izd. centr BГУ, 2004. 531 s. (in Russ.)
4. Ocenka ravnomernosti oblucheniya poluprovodnikovyh plastin v kamere ustanovki BTO / V.A. Pilipenko [i dr.] // Vestn. BГУ. Ser. 1. 2015. № 1. S. 34–37. (in Russ.)
5. Strukturno-morfologicheskie osobennosti granicy razdela Si/PtSi v diodah Shottki dlja silivoj mikroelektroniki / A.S. Turcevich [i dr.] // Vakuumnaja tehnika i tehnologija. T.16, № 4. S. 271–275. (in Russ.)
6. Model' termicheskogo okisleniya kremnija pri bystroj termicheskoj obrabotke / V.A. Pilipenko [i dr.] // Vestn. BГУ. Ser. 1. 2006. № 2. S. 35–39. (in Russ.)

### Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Горушко В.А., ведущий инженер ГЦ «Белмикрoанализ» филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

### Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. Казинца, 121А,  
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –  
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
тел. +375-17-212-37-41;  
e-mail: office@bms.by  
Пилипенко Владимир Александрович.

### Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, general manager of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Pilipenko U.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National academy of sciences of Belarus, deputy director of science development of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Harushka V.A., leading engineer of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

### Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,  
Minsk, Kazintsa st., 121A,  
JSC «INTEGRAL» –  
holding managing company «INTEGRAL»  
tel. +375-17-212-37-41;  
e-mail: office@bms.by  
Pilipenko Uladzimir Aleksandrovich