

В области значений $\Psi > \Psi^*$ мы имеем «лазер с сильно анизотропным резонатором», одно- и двухчастотные режимы генерации которого подробно исследованы многими авторами. В областях I и II возможны режимы одночастотной генерации линейно поляризованных волн.

В лазере с циркулярной фазовой анизотропией резонатора φ ($\psi = 0$) для перехода $j \rightarrow j$ в результате бифуркации типа вилки волна с круговой поляризацией (см. рисунок 1, б) в точке $\varphi = 0$ распадается на две волны с ортогональными, линейными состояниями поляризации, которые являются собственными состояниями поляризации среды. При $\varphi > 0$ в области I появляется бистабильность двухчастотных режимов с близкими к линейным состояниями поляризации, азимуты которых вращаются в противоположные стороны (показаны на рисунке стрелками), а интенсивности и эллиптичности описываются выражениями:

$$I_1 = \frac{P_1/P - a}{\theta_1}, \quad \text{th } 2\beta_1 = \pm \frac{a\theta_1}{(P_1/P - a)\theta_2}, \quad (6)$$

$$a = (1 - \cos 4\varphi) / \tau_0.$$

УДК 621.78.014.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИН ПРИ БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ НА УСТАНОВКЕ «УБТО 1801»

Соловьёв Я.А.¹, Пилипенко В.А.¹, Яковлев В.П.², Хлопков Н.С.², Гринцевич Е.В.², Сарычев О.Э.¹

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

²ООО «Перспективные инновационные технологии»
Минск, Республика Беларусь

Быстрая термическая обработка (БТО) кремниевых пластин является одной из ключевых операций в полупроводниковой технологии, значение которой возрастает одновременно с уменьшением размеров элементов интегральных схем [1]. Самым распространенным способом БТО является нагрев пластин до заданной температуры некогерентным световым излучением кварцевых галогенных ламп импульсами секундной длительности, который реализует режим теплового баланса, т.е. обеспечивается однородное распределение температуры по объему пластины [2]. При этом важно избегать неоднородного поглощения светового потока по площади пластины, что при БТО кремниевых подложек со сформированными *p-n*-переходами и топологическим рельефом может быть гарантировано только при их облучении с обратной стороны. Данная схема БТО целиком реализована в установке «УБТО 1801», в которой нагрев пластин осуществляется световым импульсом прямоугольной формы с задаваемой мощностью и длительностью, а контроль температуры рабочей стороны пластины осуществляется с по-

Выбор одного из этих решений, связанных с преобразованием G будет задаваться резонатором. Переход из области I в область II не сопровождается бифуркацией, и граница раздела между этими областями условна. Область II, где значение эллиптичности (сплошная линия на рисунке) возрастает от очень малой величины, задаваемой активной средой, до больших значений, задаваемых резонатором, соответствующих циркулярной анизотропии, можно рассматривать как область конкуренции анизотропии среды и резонатора (лазер со слабо анизотропным резонатором). В областях III и IV поляризация задается резонатором (лазер с сильно анизотропным резонатором).

Литература

1. De Lang H. Polarization properties of optical resonators, passive and active. // Philips Research Repts. Suppl. – 1967, No. 8. – P. 3–75.
2. Войтович А.П., Севериков В.Н. Лазеры с анизотропными резонаторами. – Минск: Наука и техника, 1988. – 272 с.
3. Svirina L.P. Polarization symmetry-breaking and restoration in vectorfield lasers // J of Optics B. – 2001. – Vol. 3, No. 1. – P. S133–S138.

мощью пирометра «Термоскоп-600-1С» и платино-родиевой термопары ТП-0188/2-1-ПП(S) [3]. Однако как термопарный, так и пирометрический контроль температуры поверхности кремниевых пластин при БТО в данных условиях нагрева имеют соответствующие ограничения. На показания термопары существенное влияние оказывает искажение температурного поля пластины в зоне их контакта [4], а также ее тепловая инерция [5]. Пирометрический контроль ограничен нижним порогом чувствительности пирометра, необходимостью учета степени черноты контролируемой поверхности пластины, определяемой материалом покрытия и температурной зависимостью степени его черноты, а также фазовыми изменениями в материале покрытия. Таким образом, для улучшения управляемости процесса нагрева БТО кремниевых пластин и точности контроля температуры необходимо установить зависимость температуры пластины от условий БТО.

Постановка задачи. Зависимость температуры кремниевой пластины при БТО описывается уравнением теплопроводности [1, 2]:

$$\rho c h \frac{dT}{dt} = (1 - R)\eta_{эл} P_{эл} - 2\varepsilon_{Si} \sigma (T^4 - T_{окр}^4), \quad (1)$$

где ρ – плотность кремния [$\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$], c – удельная теплоемкость кремния [$\text{Дж}\cdot\text{г}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$], h – толщина кремниевой пластины [см], T – температура пластины [К], t – время нагрева [с], R – коэффициент отражения ИК излучения ламп от поверхности нагреваемой пластины, $P_{эл}$ – электрическая мощность ламп [Вт], $\eta_{эл}$ – коэффициент преобразования электрической мощности ламп нагрева в плотности мощности светового потока [см^2], ε_{Si} – степень черноты кремния, σ – постоянная Стефана-Больцмана [$\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$], $T_{окр}$ – температура стенок камеры [К].

Таким образом, для моделирования температуры нагрева пластины необходимо установить численное значение коэффициента $\eta_{эл}$.

Методика эксперимента. С целью определения температуры пластины использовали известные температуры фазовых переходов: образование эвтектики алюминий-кремний – 850,2 К, плавление алюминия – 933,5 К и плавление серебра – 1 235,1 К. Для этого на рабочую сторону высоколегированной пластины марки КЭМ 0,003 (111) с полированной и шлифовано-травленной обратной стороной наносили тонкие пленки алюминия и серебра. Во избежание формирования эвтектики алюминий-кремний при исследовании точки плавления перед нанесением алюминия на рабочей поверхности кремниевой пластины формировали слой SiO_2 толщиной порядка 0,1 мкм. Далее пластины нагревали в камере установки «УБТО 1801» при заданной мощности в течение 40 с. Отсчет времени производили встроенным таймером системы управления установкой с дискретностью $\Delta t = 96$ мс. Момент фазового перехода фиксировался по изменению показаний пирометра.

Численное интегрирование уравнения (1) с учетом материала покрытия рабочей стороны пластины выполняли в соответствии с выражением:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[(1-R)\eta_{эл} P_{эл} - (\varepsilon_{Si} + \varepsilon_{Me}) \sigma (T_i^4 - T_{окр}^4)] \Delta t}{\rho(T_i) c(T_i) h}, \quad (2)$$

где T_0 – начальная температура пластины, n – количество интервалов нагрева длительностью Δt , ε_{Me} – степень черноты материала покрытия рабочей стороны пластины.

Зависимость плотности кремния от температуры рассчитывали по общепринятой формуле:

$$\rho(T) = \rho_0 [1 - 3\alpha(T)(T - T_0)], \quad (3)$$

где $\rho_0 = 2,33$ [$\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$] – плотность кремния при температуре T_0 , $\alpha(T)$ – термический коэффициент линейного расширения кремния с учетом температуры пластины. Величину $\alpha(T)$, в свою очередь, определяли на основании справочных данных [6] в диапазоне температур от 300 К до

1 400 К и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$\alpha(T) = -4,29 \cdot 10^{-18} T^4 + 1,6 \cdot 10^{-14} T^3 - 2,21 \cdot 10^{-11} T^2 + 1,56 \cdot 10^{-8} T - 5,91 \cdot 10^{-7}. \quad (4)$$

Зависимость $c(T)$ в диапазоне температур от 300 К до 1400 К определяли на основании справочных данных [6] и аппроксимировали полиномом четвертой степени:

$$c(T) = -8,62 \cdot 10^{-13} T^4 + 3,41 \cdot 10^{-9} T^3 - 4,85 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,1 \cdot 10^{-3} T + 0,132. \quad (5)$$

Значение параметра ε_{Si} принимали равным 0,7 [1]. Величину параметра ε_{Me} для алюминия принимали равной [7]:

$$\varepsilon_{Me} = 5,14 \cdot 10^{-5} T + 1,34 \cdot 10^{-2}, \quad (6)$$

а для серебра [7]:

$$\varepsilon_{Me} = 3,15 \cdot 10^{-5} T + 4,11 \cdot 10^{-3}. \quad (7)$$

Величину параметра R принимали равной 0,3.

Решение уравнения (2) относительно параметра $\eta_{эл}$ осуществляли итерационным методом путем подстановки вместо параметра T известной температуры соответствующего фазового перехода материала покрытия рабочей стороны кремниевой пластины, а вместо параметра n – номера интервала нагрева, после которого был зафиксирован фазовый переход.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов расчета в параметра $\eta_{эл}$ в соответствии с формулами (2–7) (таблица 1) показывает, что его максимальный разброс не превышает $\pm 5\%$. Это может быть обусловлено дисперсией коэффициента отражения нерабочей поверхности пластины, мощности нагрева, а также незначительными отклонениями от расчетных значений степени черноты кремния и покрытий, связанных с состоянием поверхности. При этом погрешность предсказания температуры пластины в соответствии с формулой (2) при ее увеличении на 550 К не превышает 2,3%, а при увеличении температуры на 930 К – не превышает 2,0%.

Таблица 1 – Результаты расчета параметра $\eta_{эл}$

Температура фазового перехода, °К	Тип обратной стороны пластины	Электрическая мощность ламп, Вт	Время нагрева пластинны до фазового перехода, с	$\eta_{эл} \times 10^{-3}$ см ²
850,2	полированная	708,2	34,176	4,93
	шлифовано-травленная	712,7	39,168	5,04
933,5	полированная	1 059,5	24,384	5,18
	шлифовано-травленная	1 063,4	24,384	5,07
1 235,1	полированная	2 736,6	16,32	5,42
	шлифовано-травленная	2 740,0	16,32	5,38

С учетом изложенного, для прогнозирования температуры нагрева кремниевой пластины (без покрытий) при БТО на установке «УБТО 1801» выражение (2) принимает следующий вид:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,17 \cdot 10^{-3} (1-R) P_{эл} - \sigma (T_i^4 - T_{окр}^4)] \Delta t}{\rho(T_i) c(T_i) h}. \quad (8)$$

Заключение. На базе уравнения теплопроводности разработана математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин при БТО на установке «УБТО 1801», предсказывающая температуру пластины при ее увеличении на 550–930 К с погрешностью менее 2,3 %.

Литература

1. Doering R. Handbook of semiconductor manufacturing technology / R. Doering, Y. Nishi. New York; CRC Press, 2008. – 1722 p.

2. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Мн.: Изд. Центр БГУ, 2004. – 531 с.

3. Солодуха В.А. Роботизированная установка быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники / В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко, В.П. Яковлев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 92–97.

4. Кулаков М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М.В. Кулаков, Б.И. Макаров. – М.: «Энергия», 1969. – 136 с.

5. Сорокин Д.Н. Динамические характеристики термопар / Д.Н. Сорокин, Ю.П. Джусов. – Обнинск.: ФЭИ, 1973. – 29 с.

6. Шелудяк Ю.Е. Теплофизические свойства компонентов горючих систем / Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров, Л.А. Малинин, В.Н. Цалков. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992. – 184 с.

7. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М.: «Энергия», 1977. – 344 с.

УДК 621.382.002

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOF ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Данилевич Д.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Актуальной проблемой микро- и наноэлектроники является поиск новых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k-диэлектрики) и разработка современных технологий формирования тонкопленочных слоев из этих материалов. В качестве изолирующих диэлектрических слоев с низкой диэлектрической проницаемостью могут использоваться различные классы органических и неорганических соединений, а также гибридные неорганические - органические соединения. Традиционные диэлектрики, например SiO₂, имеют ε = 3,9 и выше, что не удовлетворяет современным требованиям. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их фтором [1].

В последние годы все больше внимания исследователей привлекают методы, основанные на нанесении тонкопленочных покрытий из ионных потоков или пучков [2]. Нами предложен новый метод синтеза легированных пленок диоксида кремния, использующий для формирования ионных пучков вторичный плазменный разряд в ионном источнике на основе ускорителя с анодным слоем [3]. Внешний вид пучка приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид ионного пучка

Проведено исследование влияния состава рабочего газа и температуры подложки на структурно-фазовые, электрофизические и оптические характеристики покрытий из SiOF. Экспериментальные исследования проводили на установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. В качестве рабочих газов использовались, смесь моносилана с аргоном (5 % SiH₄+95 % Ar), хладон-14 и кислород. Покрытия наносились на неподвижные подложки из кремния и стекла К8. Остаточное давление составляло ~4,0·10⁻³ Па, ускоряющее напряжение –2,0 кВ, ток разряда –60 мА, потенциал диафрагмы – 0. Скорость нанесения изменялась в диапазоне 1,1–1,2 нм/с. Температура подложки не превышала 313 К. Результаты исследования состава рабочего газа на электрофизические параметры слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения электрофизических параметров слоев

P _{O2} , Па	P _{CF4} , Па	P _{SiH4} , Па	ε	tgδ	ρ _v , Ом·м
2,4·10 ⁻²	3,0·10 ⁻²	5,7·10 ⁻²	5,70	0,18	1,8·10 ⁴
2,5·10 ⁻²	3,6·10 ⁻²	5,8·10 ⁻²	3,11	0,39	1,4·10 ⁴
2,4·10 ⁻²	4,0·10 ⁻²	5,8·10 ⁻²	2,89	0,06	1,05·10 ⁵

Анализ данных таблицы показывает, что увеличение парциального давления хладона-14 способствовало существенному улучшению электрофизических параметров слоев. Диэлектрическая проницаемость существенно снижалась до ε = 2,89 при давлении хладона 4,0·10⁻² Па, диэлектрические потери – до tgδ = 0,06, а