

дин/см². Из выражения (5) следует, что напряжение в подложке меняет знак в точке $z = -0.66d_2$, т. е. на расстоянии 66 мкм от границы пленки. Вблизи пленки в подложке формируется область сжатия, а при $z > 66$ мкм – область растяжения. Выражение для напряжения в подложке содержит малый параметр d_1/d_2 и, следовательно, его величина примерно на два порядка меньше напряжений в пленке.

Растягивающие напряжения в плоскости пленки приводят к сдвигу экстремумов зон, а также к снятию вырождения валентной зоны в Г-точке. Воспользуемся выражениями для энергетических зазоров между минимумом зоны проводимости в центральной долине и минимумами подзон тяжелых и легких дырок [5]:

$$E_g^T = E_g^T(\varepsilon_c = 0) + 2a \left(1 - \frac{C_{12}}{C_{11}}\right) \varepsilon_c \pm b \left(1 + \frac{2C_{12}}{C_{11}}\right) \varepsilon_c \quad (6)$$

где $a = -8.97$ эВ и $b = -1.88$ эВ – деформационные потенциалы германия, $C_{11} = 128.53$ ГПа и $C_{12} = 48.26$ ГПа постоянные упругой жесткости, $\varepsilon_{||}$ – компонента латеральной деформации в плоскости пленки; знак “+” соответствует подзоне легких дырок, а “–” – тяжелых. Латеральная деформация рассчитывается из следующего выражения

$$\varepsilon_{||} = \frac{C_{11}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})} \sigma_1. \quad (7)$$

Подставляя в (7) рассчитанное ранее значение для термоупругих напряжений, находим $\varepsilon_{||} \approx 0.053$. При такой деформации, как следует из выражения (6), ширина прямой запрещенной зоны может уменьшаться до значения 0.3 эВ (в нормальных условиях 0.8 эВ).

Из проведенных расчетов следует, что при поверхностном характере нагрева под действием наносекундного лазерного излучения изменение ширины прямой запрещенной зоны пленки германия в структуре Ge/Si, обусловленное термическими напряжениями, примерно в $\alpha_1/(\alpha_1 - \alpha_2) \approx 1.8$ раз превышает изменения ширины зоны в условиях однородного нагрева.

Расчётные данные показали, что термические напряжения, возникающие при облучении наносекундными лазерными импульсами тонкопленочного Ge на кремниевой подложке, приводят к модификации зонной структуры Ge, а именно, к сужению ширины запрещенной зоны, причём, изменение ширины запрещенной зоны при наносекундном лазерном нагреве существенно превышает изменения при однородном нагреве.

Литература

1. Sun, X. Direct gap photoluminescence of n-type tensile-strained Ge-on-Si / X. Sun [et al.] // Appl. Phys. Lett., 2009. – Vol. 95, iss.1. – P. 011911
2. Kurdi, M. El. Enhanced photoluminescence of heavily n-doped germanium / M. El Kurdi [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2009. – V. 94. –P. 191107.
3. Timoshenko S. Analysis of bi-metal thermostats / J. Opt. Soc. Amer., 1925, vol.11, pp. 233-255.
4. Tsui R.K., Gershenson M. Plastic deformation and fracture resulting from stresses caused by differential thermal contraction in GaP /Si heterostructures / Appl. Phys. Lett., 1980, vol. 37, pp. 218-220.
5. Deformation potential constants of biaxially tensile stressed Ge epitaxial films on Si.100/ J.Liu [et al.]. Phys. Rev. B.-2004.-V.70.-P. 155309.

УДК 614.842

ТЕСТОВЫЙ ПОЖАР НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ, МОДЕЛИРУЮЩИЙ УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА ТЛЕНИЯ В ПЛАМЕННОЕ ГОРЕНИЕ

Антошин А.А., Никитин В.И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Известно, что мультикритериальные пожарные извещатели успешно внедряются во всем мире, так как способны обнаруживать пожар с высокой достоверностью. Отличие мультикритериального извещателя от комбинированного заключается в наличии у него сложного алгоритма обработки информации по сравнению с простой логикой «ИЛИ» у комбинированных пожарных извещателей [1].

В испытаниях пожарных извещателей широко используются тестовые пожары. В Европейских нормах используются шесть типов тестовых пожаров: TF1 – горение древесины, TF2 – тление древесины, TF3 – тление хлопка, TF4 – горение пенополиуретана, TF5 – горение гептана, TF6 – горение спирта [2] и [3], каждый из которых моделирует один тип горения, пламенной или тление, но с образованием дыма с разными характеристиками. В Российской Федерации разработан стандарт по

испытаниям мультикритериальных пожарных извещателей (ГОСТ Р 57552-2017), в котором используются тестовые пожары: ТП-1 (горение древесины), ТП-2 (тление древесины), ТП-3 (тление со свечением хлопка), ТП-4 (горение полимерных материалов), ТП-5 (горение легковоспламеняющейся жидкости с выделением дыма), ТП-8 (горение легковоспламеняющейся жидкости с выделением черного дыма). Однако и в этом случае каждый тестовый пожар моделирует один тип горения.

Хорошо известно, что пламенное горение твердых горючих материалов начинается с термического разложения, в результате которого образуются горючие газы, которые при нагреве воспламеняются. Процесс термического разложения материала может сопровождаться достаточно большим тепловыделением, что может привести к тлению. Тление при определенных условиях (большая кон-

центрация горючих газообразных продуктов горения и высокая температура) может перейти в пламенное горение. Однако обнаружение мультикритериальными пожарными извещателями пожаров, когда в начальной его стадии может наблюдаться переход тления в пламенное горение изучено недостаточно. В настоящее время не созданы научные основы для разработки тестовых пожаров, моделирующих такие пожары в лабораторных условиях проведения испытаний.

В данной работе исследовано изменение характеристик окружающей среды в условиях нагрева образцов древесины разного размера до температуры самовоспламенения. Измерялись концентрация угарного газа (СО), удельная оптическая плотность и поток оптического излучения, рассеянный на углы от одиннадцати до пятнадцати градусов, а также температура на нагревательной поверхности электроплитки и в двух точках на потолке испытательной камеры.

Исследования проводились в испытательной камере размером 2х2х2 метра с вытяжным каналом. В вытяжном канале устанавливаются датчики температуры, угарного газа и измерительная система для измерения оптических характеристик газозадушной среды. На полу испытательной камеры устанавливалась электроплитка, мощностью 2 кВт, диаметром 220 мм с восьмью концентрическими каналами глубиной 2 мм и шириной 5 мм каждая. Поверхность плиты нагревалась до 600 °С.

В качестве топлива для тестовых пожаров использовались образцы древесины с размерами, приведенными в таблице.

Таблица – Характеристики образцов топлива для тестовых пожаров

| № образца | Размеры, мм | Масса, г | Порода древесины |
|-----------|-------------------------------|----------|------------------|
| 1 | 2х10х75 | 14 | ель |
| 2 | 3,5х10х75 | 13,7 | лиственница |
| 3 | 6х10х75 | 13,5 | лиственница |
| 4 | 20х20х75 | 11,5 | лиственница |
| 5 | листы мятой бумаги формата А4 | 4,5 | – |

В качестве средств измерения параметров окружающей среды при горении тестовых пожаров использовались: газоанализатор дымовых газов Multilyzer NG (с погрешностью 5 % от измеренной величины); измеритель регулятор «Сосна-004» с термоэлектрическим преобразователем ТХА(К)-1199, имеющего диапазон измерения от -50 °С до +500 °С и измерительный узел установки для измерения оптических характеристик дыма (удельной оптической плотности и величины потока оптического излучения, рассеянного частицами дыма). Электроплитка при включении постепенно нагревалась до максимальной температуры (около 600°С).

Результаты исследования изменения характеристик окружающей среды при нагреве образца, изготовленного из ели толщиной 2 мм (образец №1) приведены на рисунке 1. Увеличение потока рассе-

янного излучения и значения удельной оптической плотности наблюдались, начиная с 6 минуты при температуре на поверхности плиты 325 °С. Концентрация угарного газа при этом не превышала 10ppm вплоть до самовоспламенения на 630 секунде. Воспламенение образца наблюдалось при температуре поверхности плиты 420 °С. Увеличение потока рассеянного излучения и значения удельной оптической плотности наблюдались, начиная с 6-й минуты (при температуре на поверхности плиты 325 °С). После воспламенения образца увеличение потока оптического излучения, рассеянного дымом уменьшается при сохранении скорости увеличения удельной оптической плотности задымленной среды, что подтверждает тот факт, что при пламенном горении образующиеся более мелкие частицы дыма меньше рассеивают оптическое излучение.

Температура на потолке испытательной камеры изменялась слабо, достигая своего максимума (26,2 °С) за 1,5 минуты до воспламенения (9 мин). Угарный газ достиг своего максимального значения на 12 минуте спустя 2,5 минуты после воспламенения.

При нагревании образцов толщиной более двух миллиметров (№2-5) воспламенения не наблюдалось, но при этом обнаружена зависимость концентрации угарного газа от исходной толщины образца. Чем толще образец, тем позднее и при большей температуре на поверхности плиты появлялся угарный газ. Кроме того, замечено, что при появлении угарного газа температура у потолка испытательной камеры постепенно снижается.

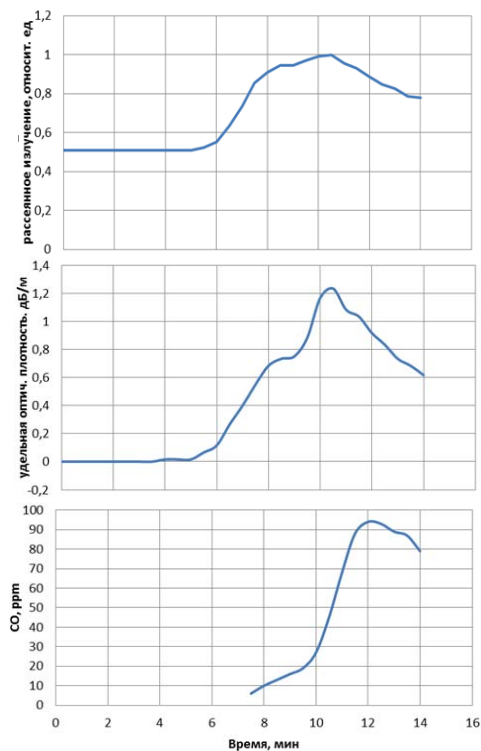


Рисунок 1 – Изменения рассеянного излучения, удельной оптической плотности, концентрации угарного газа при нагреве деревянных брусочков размерами 2х10х75 мм

Выводы. Установлена зависимость удельной оптической плотности окружающей среды, рассеивающей способности образующегося при горении дыма и концентрации угарного газа, а также динамики их изменения от типа горения (тление или пламенное). При сложном алгоритме работы мультикритериального пожарного извещателя такие особенности изменения параметров окружающей среды могут привести к сбою в его работе.

Установлено, что для тестового пожара на основе древесины, имитирующего переходной процесс от тления к пламенному горению, необходимо применять образцы толщиной не более 2 мм.

УДК 621.3.049

**ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ
НА БАЗЕ СТРУКТУР С МНОГОЗАРЯДНЫМИ ПРИМЕСЯМИ
Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.**

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

Фотоэлектрические полупроводниковые преобразователи (ФЭПП) являются элементной базой фотоприёмных устройств различного назначения. Основными параметрами ФЭПП являются динамический диапазон энергетической характеристики, спектральная чувствительность, быстродействие, зависящие от физических параметров полупроводникового материала. Для расширения динамического диапазона и управления спектральной чувствительностью ФЭПП с собственной фотопроводимостью предложено использовать многозарядные примеси в невысокой концентрации ($<10^{14}$ см⁻³), формирующие несколько глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне.

Особенностью создания структур для таких ФЭПП является требование высокой точности легирования и однородности распределения примеси по объему активной области полупроводника. Традиционные методы легирования при использовании быстродиффундирующих многозарядных примесей, такие как диффузия и ионная имплантация, не обеспечивают необходимую управляемость, точность (прецизионность) и однородность легирования. В связи с чем для создания таких структур был предложен метод твердофазного (плазменного) легирования с использованием лазерной плазмы или плазмы тлеющего разряда, отличающийся воспроизводимостью, экологичностью и прецизионностью легирования эпитаксиальных структур. Однако попытки введения цинка и меди в гидридном процессе газоразрядного легирования не увенчались успехом. Анализ возможных способов распыления твердотельных мишеней, характеризующихся определенными ограничениями на их проводимость и состояние образующейся при этом газовой атмосферы, указывает на целесообразность применения для легирования эпитаксиальных слоев кремния плазмы, формируемой при лазерном облучении мишени.

Литература

1. Членов А.Н., Буцынская Т.А., Журавлев С.Ю., Николаев В.А., Об эффективности функционирования мультикритериального пожарного извещателя // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т.25, № 12. – С. 55-60.
2. Баканов В. Мультикритериальные пожарные извещатели по российским и европейским стандартам // Технологии защиты. – 2014. – № 3.
3. Скорфилд С. Мультисенсор -эффективное решение проблемы ложных срабатываний систем пожарной сигнализации // Системы безопасности. – 2006. – № 5. – стр.128-13.

Исследования плазменного сгустка на ранних стадиях разлета показали, что в нем можно выделить три зоны, различающиеся плотностью частиц и характером газодинамического движения. На поверхности мишени формируется плотное ядро факела, поглощающее лазерное излучение. Затем следует зона ускорения, в которой происходит переход тепловой энергии плазмы в кинетическую энергию направленного газодинамического движения. Далее реализуется зона, в которой скорость движения частиц плазмы выходит на асимптотическое значение, а тепловая энергия плазмы существенно меньше энергии направленного движения. Поскольку интенсивным эмиттером ионов является, в первую очередь, область плотного горячего ядра, именно эта область и ее параметры представляют наибольший интерес. Выражения для оценки внутренней энергии E (Дж/кг), плотности ρ_m (кг/м³) и массы горячего ядра лазерной плазмы M (кг) в зависимости от мощности излучения W (Вт) и начального размера r_0 (см) плазменного сгустка

$$E \approx 5,3 \cdot 10^8 K_0 r_0 W^{4/9},$$

$$\rho_m \approx 1,3 \cdot 10^{-5} K_0 r_0^{-1} W^{1/3},$$

$$M \approx 1,9 \cdot 10^{-6} K_0 t_n r_0^{2/3} W^{5/9},$$

где $K_0 = z^3(z-1)^{9/2} \cdot A^{7/2}$, z - порядковый номер элемента, A - его атомная масса.

Как видно, в полученных соотношениях отсутствует зависимость величины E , ρ_m , M от вида химической связи между атомами мишени и такими ее параметрами, как температура плавления, теплопроводность, коэффициент поглощения. Определяющими являются мощность излучения и время воздействия лазерного импульса. Проведенное рассмотрение свойств плазмы, образованной действием мощного лазерного излучения на поверхности твердого тела показало, что лазерная плазма может быть использована в качестве источника ионов для синтеза соединений используемых при легировании эпитаксиальных структур глубо-