

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЗОННУЮ СТРУКТУРУ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ГЕРМАНИЯ

Гацкевич Е.И.<sup>1</sup>, Малевич В.Л.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физики НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Как известно, германий является непрямозонным полупроводником и характеризуется сравнительно низкой эффективностью излучательной рекомбинации. В ряде работ [1,2] для увеличения квантового выхода люминесценции в данном полупроводнике были предложены два метода: деформация полупроводника под действием растягивающих напряжений и легирование донорной примесью с высокой концентрацией ( $>10^{19}$  см<sup>-3</sup>). Под действием деформации растяжения в плоскости пленки энергии Г- и L- минимумов зоны проводимости понижаются. В германии из-за разных деформационных потенциалов энергия Г- долины понижается сильнее, чем энергия боковых L- долин, и при достаточно большой величине деформации полупроводник может стать прямозонным. Второй способ повышения эффективности излучательной рекомбинации основан на эффекте заполнения боковых L-долин равновесными электронами. Повышение уровня Ферми уменьшает вероятность переходов фотовозбужденных электронов из центральной в боковые L-долины и приводит к увеличению эффективности излучательной рекомбинации. В германии уровень Ферми достигает края зоны проводимости в Г-долине при концентрации донорной примеси  $10^{20}$  см<sup>-3</sup>.

Наносекундной лазерной обработкой тонкопленочного германия с высоким содержанием донорной примеси можно реализовать механически-напряженное состояние пленки, зависящее от уровня легирования, типа подложки и энергетического режима лазерного воздействия. Тем самым можно модифицировать зонную структуру полупроводника и повышать вероятность прямозонных переходов неравновесных электрон-дырочных пар. В процессе лазерного воздействия происходит плавление пленки германия и последующий ее эпитаксиальный рост из жидкой фазы. Преимущество данного метода по сравнению с термическим отжигом заключается в локальности.

В настоящей работе исследовано влияние деформаций, возникающих в структуре пленки германия - кремниевая подложка в процессе лазерной жидкофазной перекристаллизации, на зонный спектр германиевой пленки. Исходная структура, представляющая собой поликристаллическую пленку германия с толщиной порядка 1 мкм, нанесенную методом вакуумного напыления на кремниевую подложку, предполагается ненапряженной. В процессе лазерной перекристаллизации напряжения, возникающие из-за рассогласования постоянных решеток германия и кремния, снимаются путем

образования дислокаций несоответствия. Таким образом, главную роль в структуре пленки Ge-Si подложка будут играть термические напряжения, возникающие из-за разных коэффициентов теплового расширения в процессе остывания.

При воздействии на структуру 100 нс импульсом рубинового лазера (длина волны 0.69 мкм) глубина прогрева определяется длиной диффузии тепла за время импульса и составляет величину порядка 1–2 мкм. Поэтому в расчетах можно пренебрегать разогревом кремниевой подложки и считать, что температура пленки германия близка к точке плавления и однородна по толщине. В этом случае можно воспользоваться выражениями для расчета термических деформаций биметаллической пластины, полученными ранее в работах [3,4]. При используемых здесь приближениях выражения для упругих напряжений в пленке (1) и подложке (2) будут иметь следующий вид:

$$\sigma_1(z) = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{E_1' d_1^3 + E_2' d_2^3}{6d_1(d_1 + d_2)} + E_1' \left( \frac{d_1}{2} - z \right) \right], \quad (1)$$

$$\sigma_2(z) = -\frac{1}{\rho} \left[ \frac{E_1' d_1^3 + E_2' d_2^3}{6d_2(d_1 + d_2)} + E_2' \left( \frac{d_2}{2} + z \right) \right], \quad (2)$$

где ось  $z$  направлена перпендикулярно пленке ( $z > 0$ ), индекс “1” относится к пленке Ge, а “2” – к кремниевой подложке,  $E' = E(1 + \nu)$ ,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $d$  – толщина слоя. Радиус кривизны  $\rho$ , входящий в выражения (1, 2), определяется соотношением

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6\alpha_1(T_m - T_0) \left( 1 + \frac{d_1}{d_2} \right)}{(d_1 + d_2) \left[ 3 \left( 1 + \frac{d_1}{d_2} \right)^2 + \left( 1 + \frac{d_1 E_1'}{d_2 E_2'} \right) \left( \frac{d_1^2}{d_2^2} + \frac{d_2 E_1'}{d_1 E_2'} \right) \right]}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1 = 5.9 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup> – коэффициент термического расширения германия,  $T_m = 1210$  К – температура плавления Ge,  $T_0 = 300$  К.

Формулы (1-3) при  $d_1/d_2 \ll 1$  существенно упрощаются и принимают вид

$$\sigma_1(z) = \alpha_1(T_m - T_0) E_1' \left[ 1 + \frac{6E_1' d_1}{E_2' d_2^2} \left( \frac{d_1}{2} - z \right) \right] \quad (4)$$

$$\sigma_2(z) = -4\alpha_1(T_m - T_0) E_1' \frac{d_1}{d_2} \left( 1 + \frac{3z}{2d_2} \right) \quad (5)$$

Упругие напряжения рассчитывались по формулам (4,5) для следующих значений параметров:  $d_1 = 1$  мкм,  $d_2 = 100$  мкм,  $E_1' = 1.39 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>,  $E_2' = 1.76 \cdot 10^{12}$  дин/см<sup>2</sup>. Из расчетов следует, что в германии формируются растягивающие латеральные напряжения, однородные по толщине пленки. После остывания структуры до комнатных температур величина этих напряжений составляет  $7.5 \cdot 10^9$

дин/см<sup>2</sup>. 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-