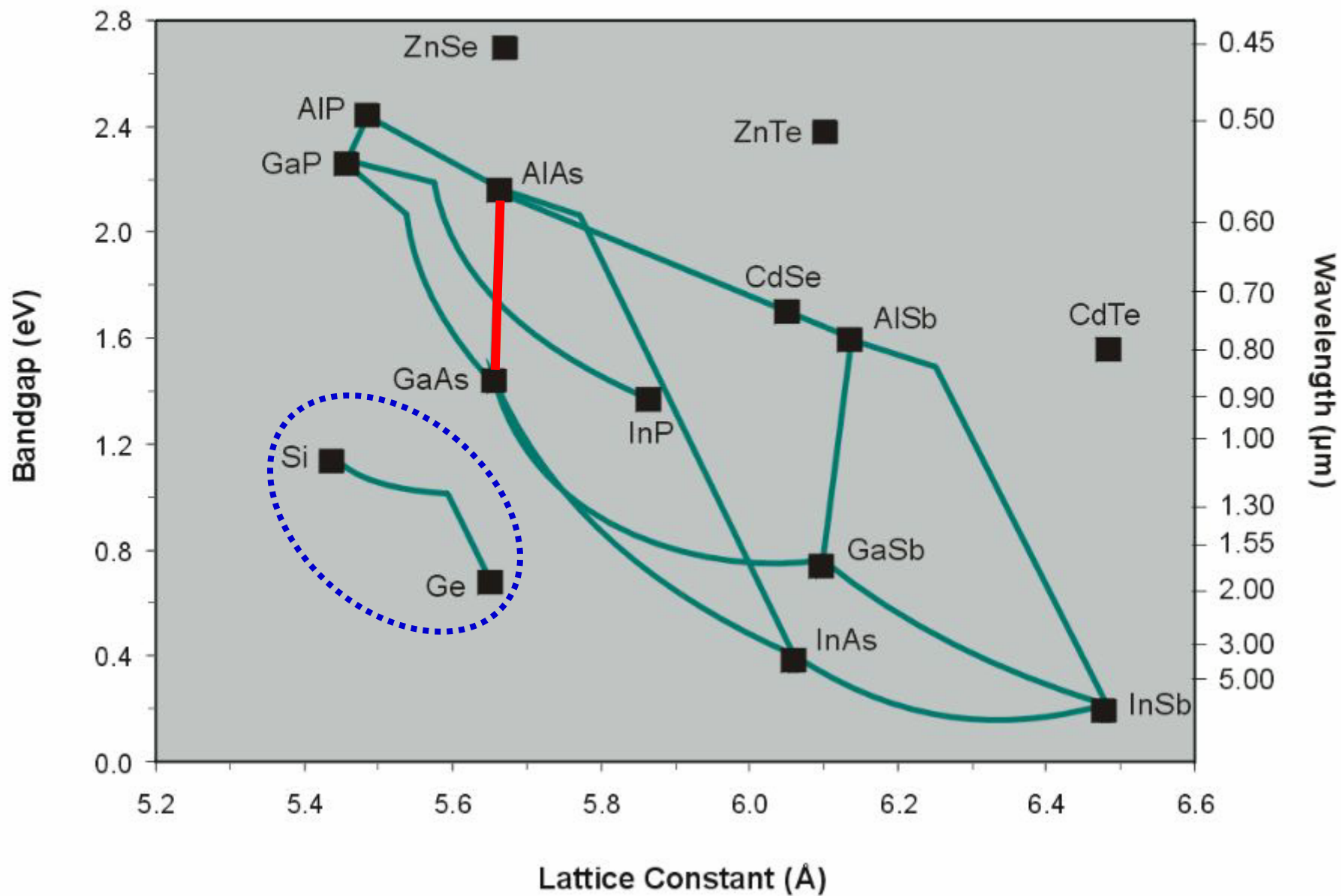


РОСТ НАПРЯЖЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР (НА ПРИМЕРЕ Si–Ge)

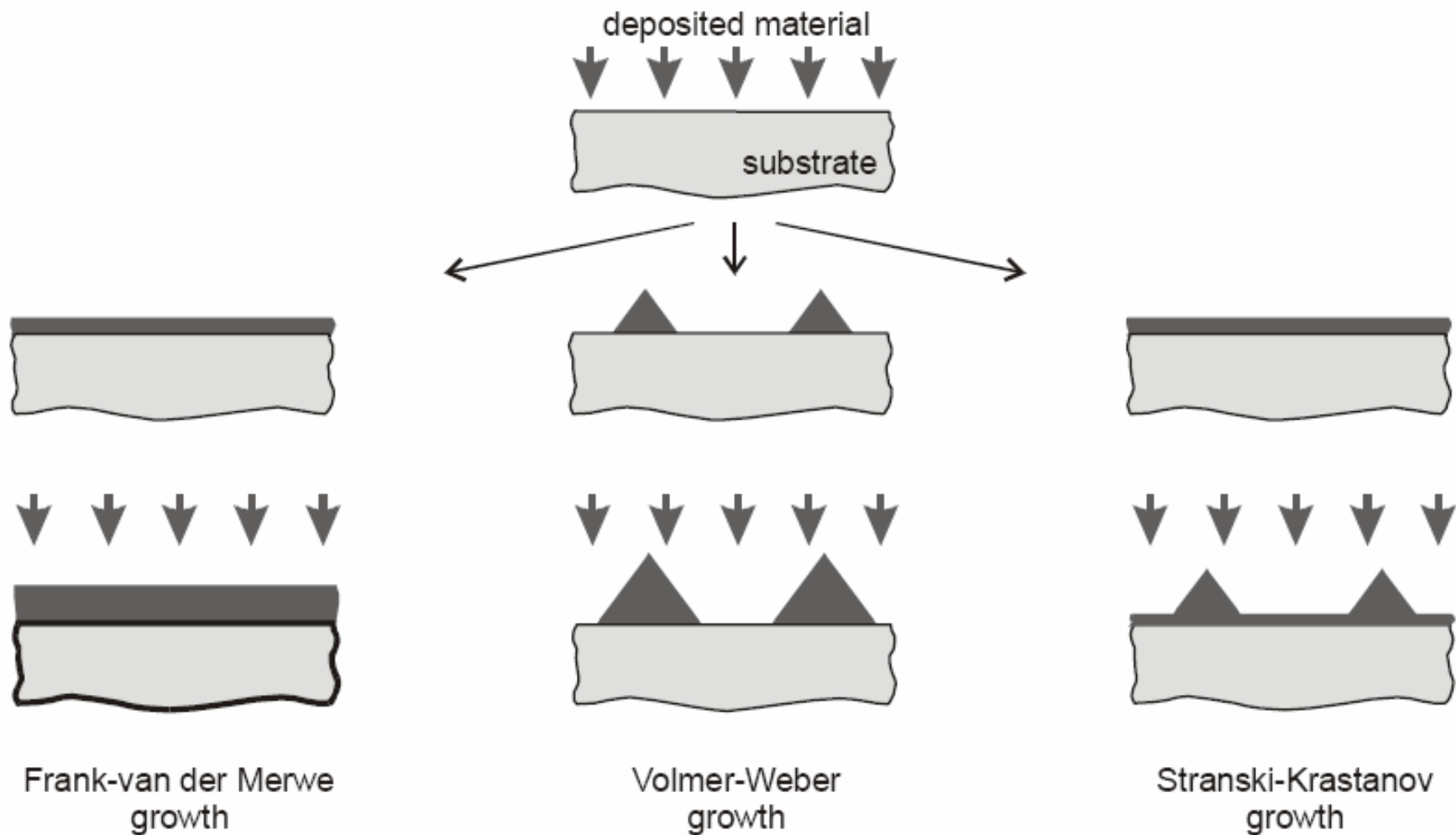
аспирант ИФМ РАН:

М.В.ШАЛЕЕВ

ПАРАМЕТР РЕШЕТКИ И ШИРИНА E_g



МЕХАНИЗМЫ РОСТА



ПОСЛОЙНЫЙ РОСТ

МЕХАНИЗМ ФРАНКА – ВАН-ДЕР-МЕРВЕ



реализуется послойный (двумерный рост)



γ_2 – поверхностная энергия эпитаксиального слоя

γ_{12} – энергия границы раздела

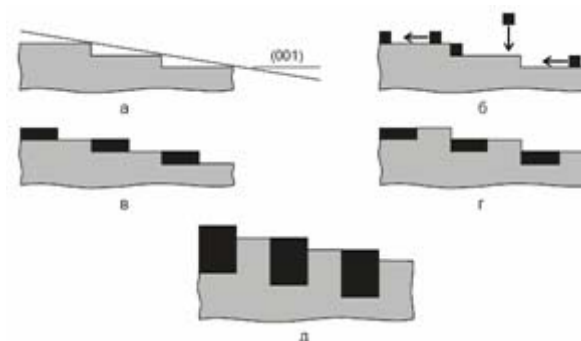
γ_1 – энергия поверхности подложки



Frank-van der Merwe
growth

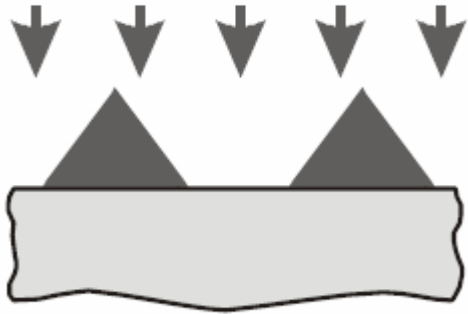
$$\gamma_2 + \gamma_{12} < \gamma_1$$

осаждаемый материал 2 смачивает подложку



РОСТ БЕЗ СМАЧИВАЮЩЕГО СЛОЯ

МЕХАНИЗМ ВОЛМЕРА – ВЕБЕРА



Volmer-Weber
growth

γ_2 – поверхностная энергия эпитаксиального слоя

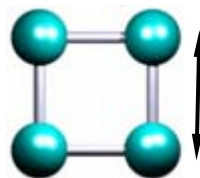
γ_{12} – энергия границы раздела

γ_1 – энергия поверхности подложки

$$\gamma_2 + \gamma_{12} > \gamma_1$$

РОСТ НАПРЯЖЕННЫХ СТРУКТУР

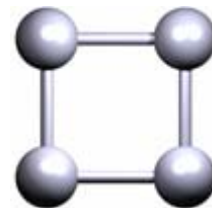
МЕХАНИЗМ СТРАНКИ – КРАСТАНОВА



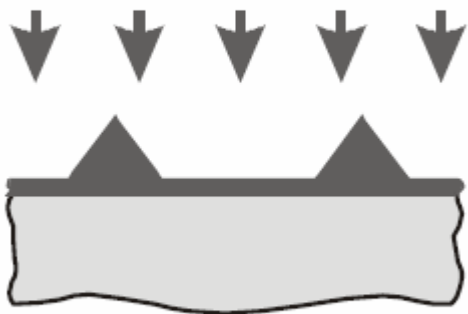
5.43 Å

4.2 %

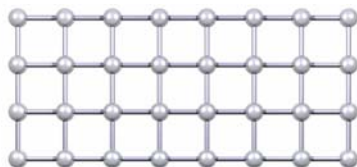
5.65 Å



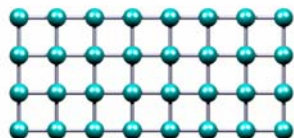
Переход от двухмерного послойного роста сплошной пленки к трехмерному росту островков (2D→3D переход) имеет место, когда межатомные расстояния в кристаллической решетке осаждаемого материала больше, чем в решетке подложки.



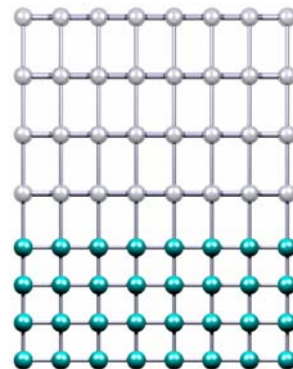
Stranski-Krastanov growth



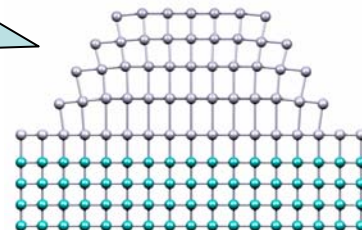
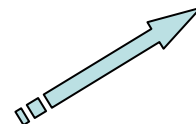
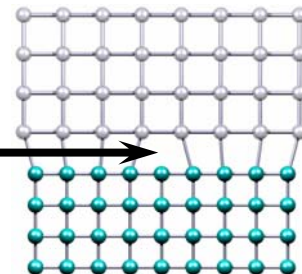
Ge



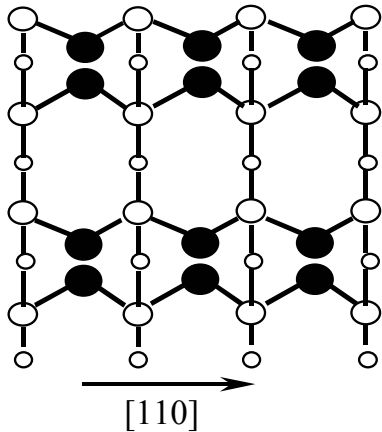
Si



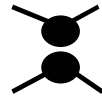
дислокации несоответствия



РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ Si(001)

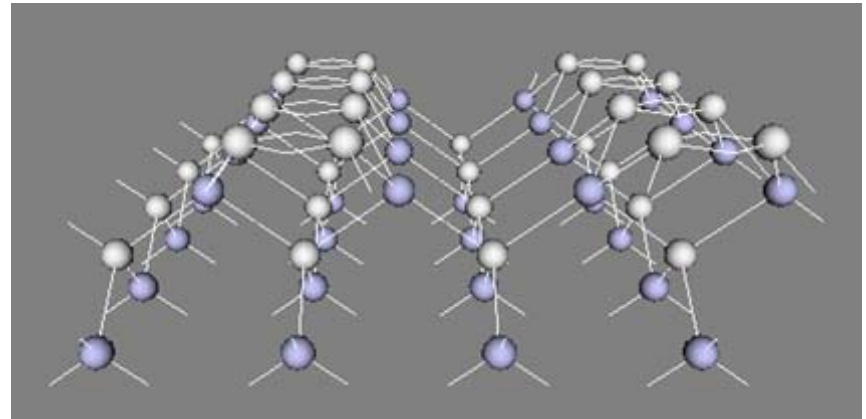
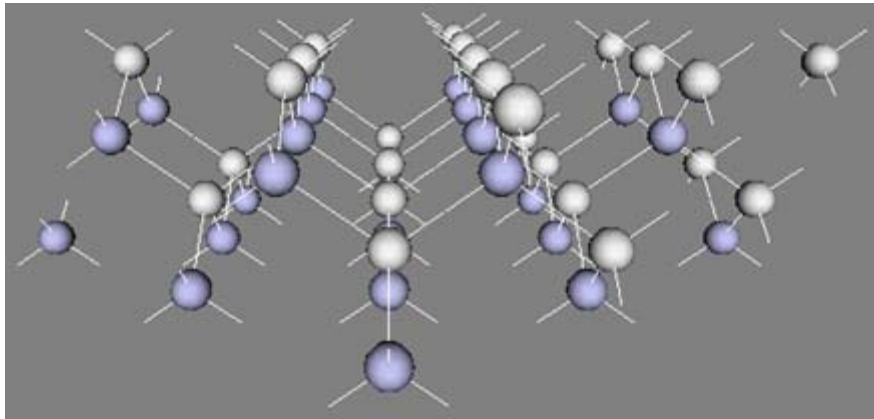


(2×1) – для роста Si на Si(001)



– димер (два близко расположенных атома Si)

Образование димеров уменьшает энергию свободных связей поверхностных атомов Si. Димеры выстраиваются в цепочки, направление которых в каждом последующем слое меняется на 90° .



Евгений Валентинович Демидов – <http://www.ipm.sci-nnov.ru/~Demidov/>

available on-line:

<http://mrgcvd.engr.wisc.edu/lagallygroup/archive/images/bsnew.gif>

STM image

Max Lagally research group –

<http://mrgcvd.engr.wisc.edu/lagally/>

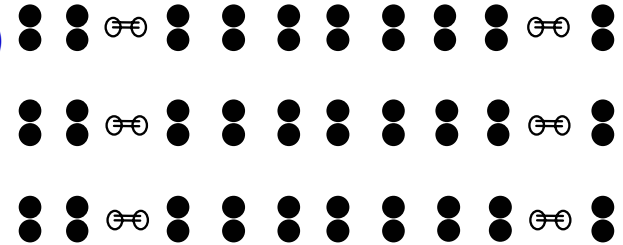
РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ Ge НА Si(001)

для роста Ge на Si(001) – $(2 \times n)$

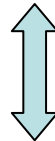
⊖⊖ – дивакансия (отсутствие в цепочке одного димера)

n – целое число, означающее, что в цепочке отсутствует каждый n -ый димер.

n уменьшается при увеличении d_{Ge} .



$n \geq 12$ для $d_{\text{Ge}} < 1$ монослоя (0.14 нм)



$n = 6 \div 10$ для $d_{\text{Ge}} \geq 2$ монослоев

available on-line:

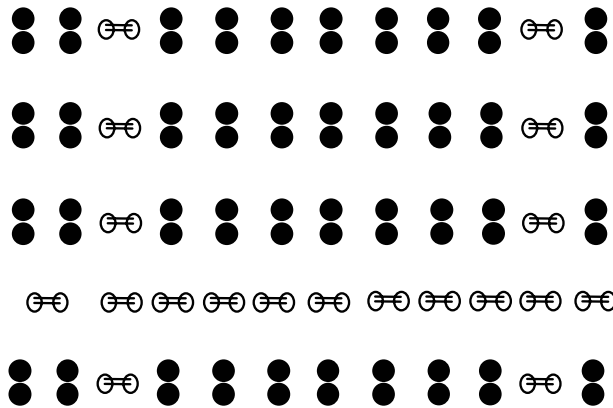
<http://mrgcvd.engr.wisc.edu/lagallygroup/archive/images/steps.gif>

STM image

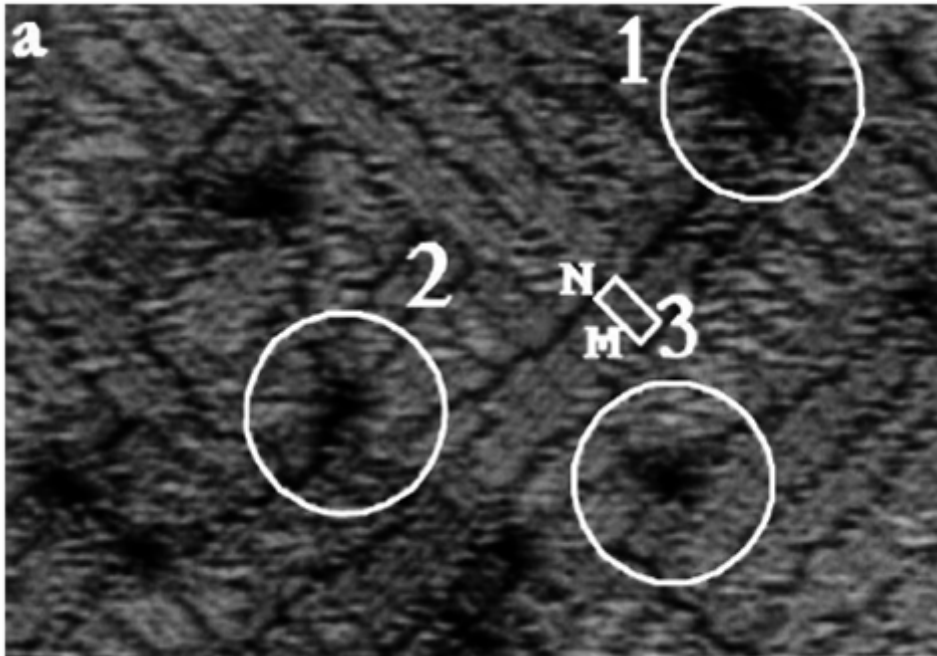
Max Lagally research group –

<http://mrgcvd.engr.wisc.edu/lagally/>

РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОВЕРХНОСТИ Ge НА Si(001)



$(m \times n)$ – при увеличении количества Ge

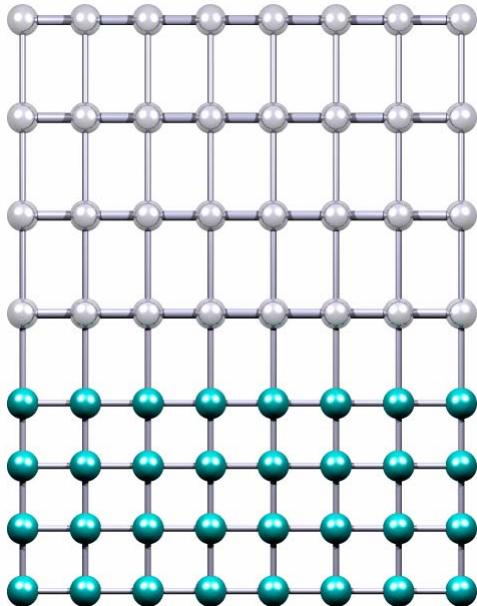
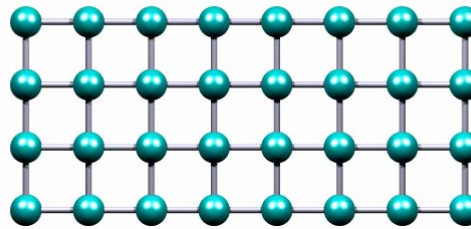
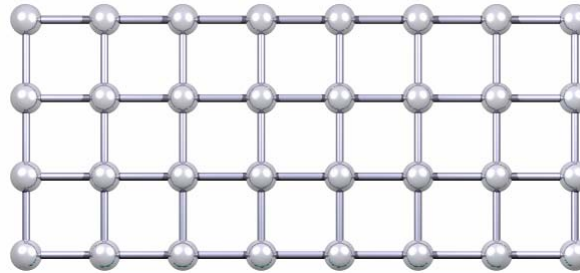


I. Goldfarb, P. T. Hayden, J. H. G. Owen, and G. A. D. Briggs, PRL 78(20), 3959 (1997).

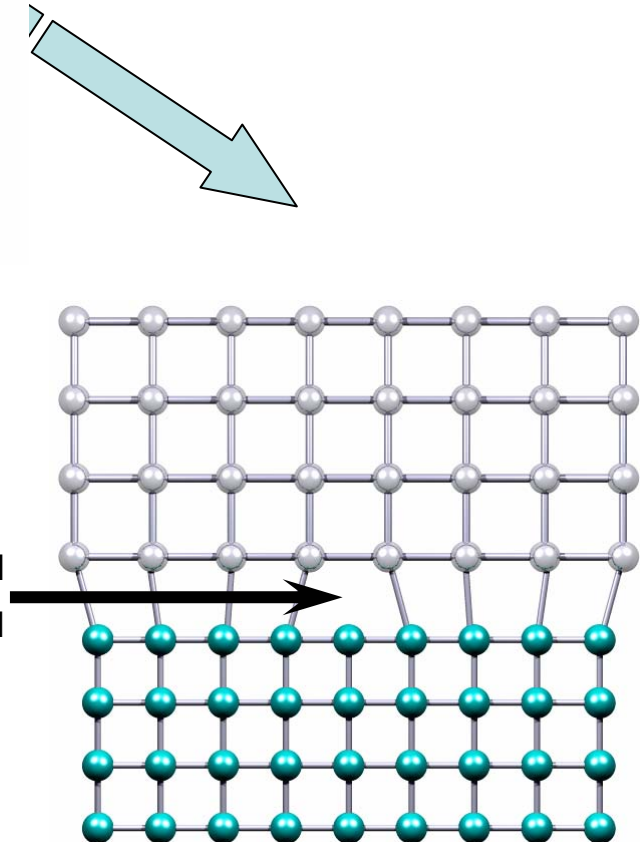
УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

РОСТ НАПРЯЖЕННЫХ И РЕЛАКСИРОВАННЫХ SiGe СЛОЕВ НА Si(001)

$$f = \frac{a_{\text{GeSi}} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}} = 0.042 \cdot x_{\text{Ge}}$$

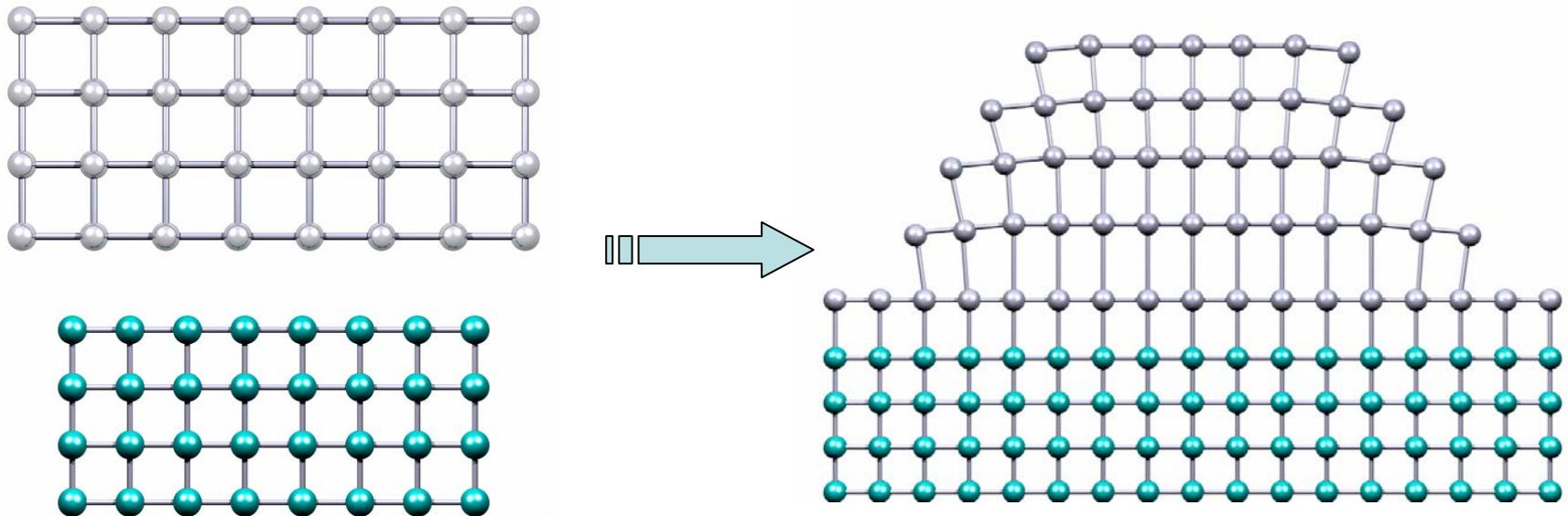


дислокации
несоответствия



УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

ФОРМИРОВАНИЕ Ge(Si) ОСТРОВКОВ



$$\Delta E_{\text{полная}} = \Delta E_{\text{упр}} + \Delta E_{\text{поверх}} < 0$$

УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

СНЯТИЕ НАПРЯЖЕНИЙ – ДИСЛОКАЦИИ НЕСООТВЕТСТВИЯ

$$E_{\varepsilon} = \frac{2G(1+\nu)}{1-\nu} \varepsilon^2 h$$

– упругая энергия напряженной единицы площади пленки толщиной h

G, ν – модуль сдвига и коэффициент Пуассона

ε – двумерная (плоская) упругая деформация, возникающая из-за разницы параметров решетки пленки и подложки:

$$f = \frac{a_f - a_s}{a_s} \left(f = \frac{a_{GeSi} - a_{Si}}{a_{Si}} = 0.042 \cdot x_{Ge} \right)$$

$$E_d = \frac{2}{\rho} \frac{Gb^2(1-\nu \cos^2 \alpha)}{4\pi(1-\nu)} \left(\ln \frac{\beta h}{b} + 1 \right)$$

– энергия единицы площади сетки дислокаций несоответствия, релаксирующих пленку

b – величина вектора Бюргерса дислокации

α – угол между вектором Бюргерса и линией дислокации

β – параметр ядра дислокации

ρ – количество дислокаций на единицу длины в плоскости границы раздела (количество дислокаций, релаксирующих пленку)

$$\rho = \frac{b_{\text{eff}}}{f - \varepsilon},$$

где b_{eff} – эффективный вектор Бюргерса (компонента вектора Бюргерса, лежащая в плоскости границы раздела в направлении, перпендикулярном ДН – величина абсолютной релаксации, являющаяся следствием появления одной ДН)

УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

СНЯТИЕ НАПРЯЖЕНИЙ – ДИСЛОКАЦИИ НЕСООТВЕТСТВИЯ

$$E_d = \frac{G(b/b_{\text{eff}})b(1-\nu \cos^2 \alpha)}{2\pi(1-\nu)}(f - \varepsilon) \left(\ln \frac{\beta h}{b} + 1 \right)$$

полная энергия пленки – $E_\varepsilon + E_d$

Величина упругих напряжений пленки ε^* , при которых эта сумма минимальна, может быть определена из выражения $d(E_\varepsilon + E_d)/d\varepsilon = 0$

$$\varepsilon^* = \frac{(b/b_{\text{eff}})b(1-\nu \cos^2 \alpha)}{8\pi h(1+\nu)} \left(\ln \frac{\beta h}{b} + 1 \right)$$

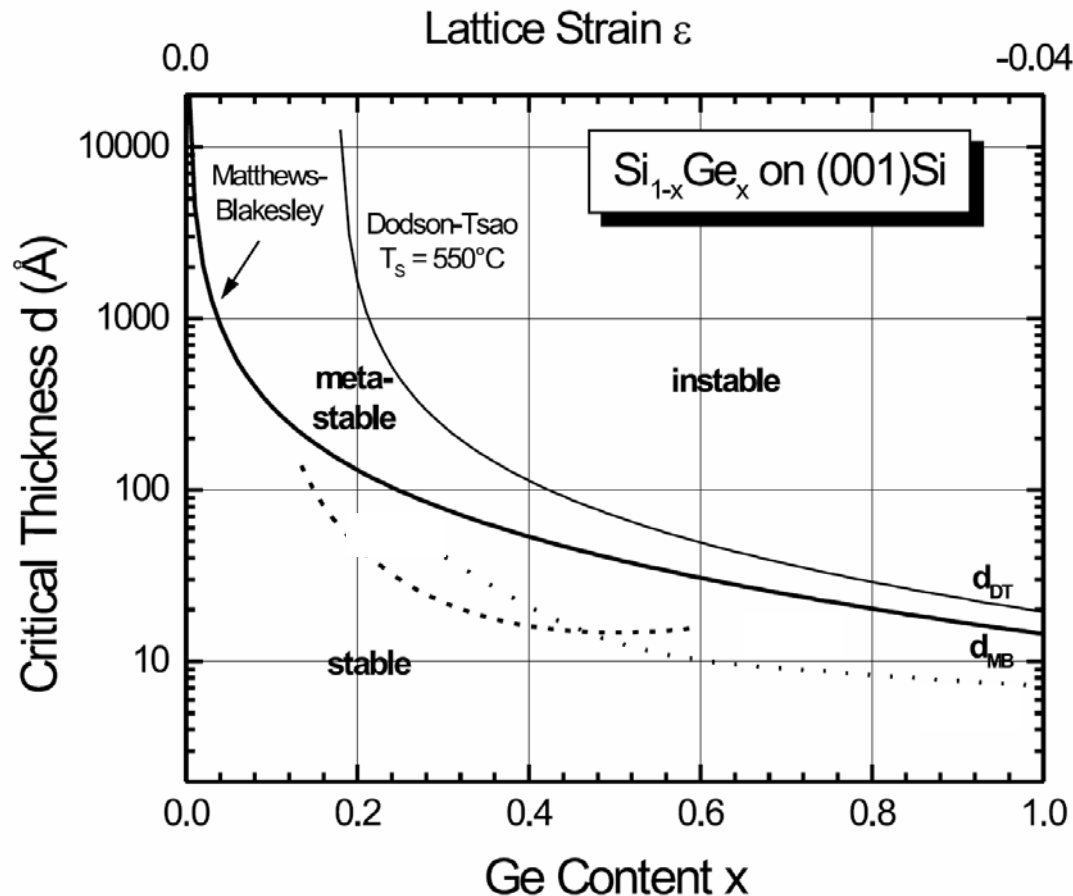
Наибольшая возможная величина для ε^* равна f .

Толщина пленки, при которой становится возможным появление первых ДН – критическая толщина:

$$h_c = \frac{(b/b_{\text{eff}})b(1-\nu \cos^2 \alpha)}{8\pi f(1+\nu)} \left(\ln \frac{\beta h_c}{b} + 1 \right)$$

УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

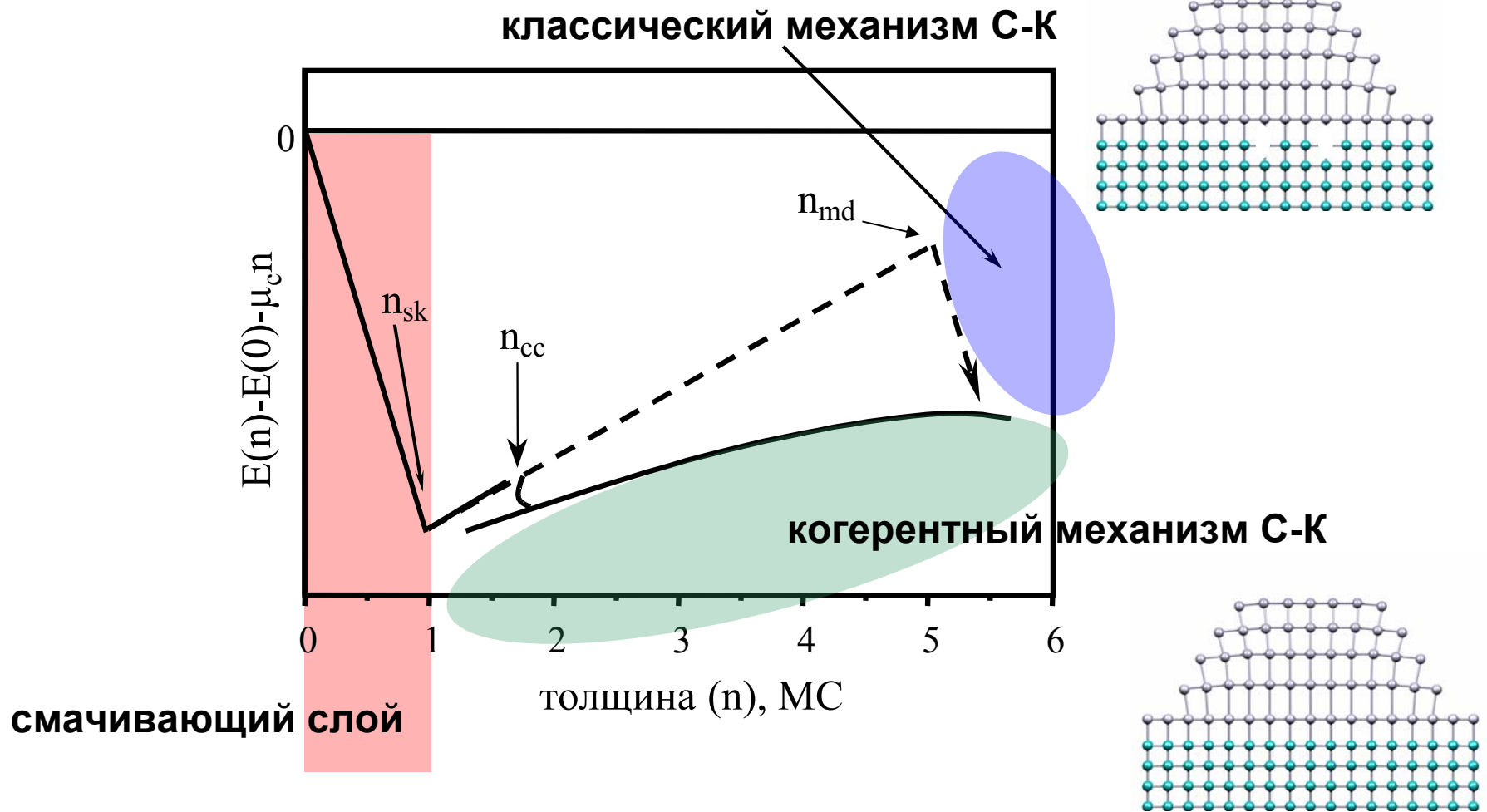
СНЯТИЕ НАПРЯЖЕНИЙ – ДИСЛОКАЦИИ НЕСООТВЕТСТВИЯ



Критические толщины напряженных SiGe слоев на Si(001) для релаксации через формирование дислокаций при высоких и средних температурах подложки d_{MB} и d_{DT} по расчетам Matthews and Blakesley (1974) и Dodson and Tsao (1987), соответственно.

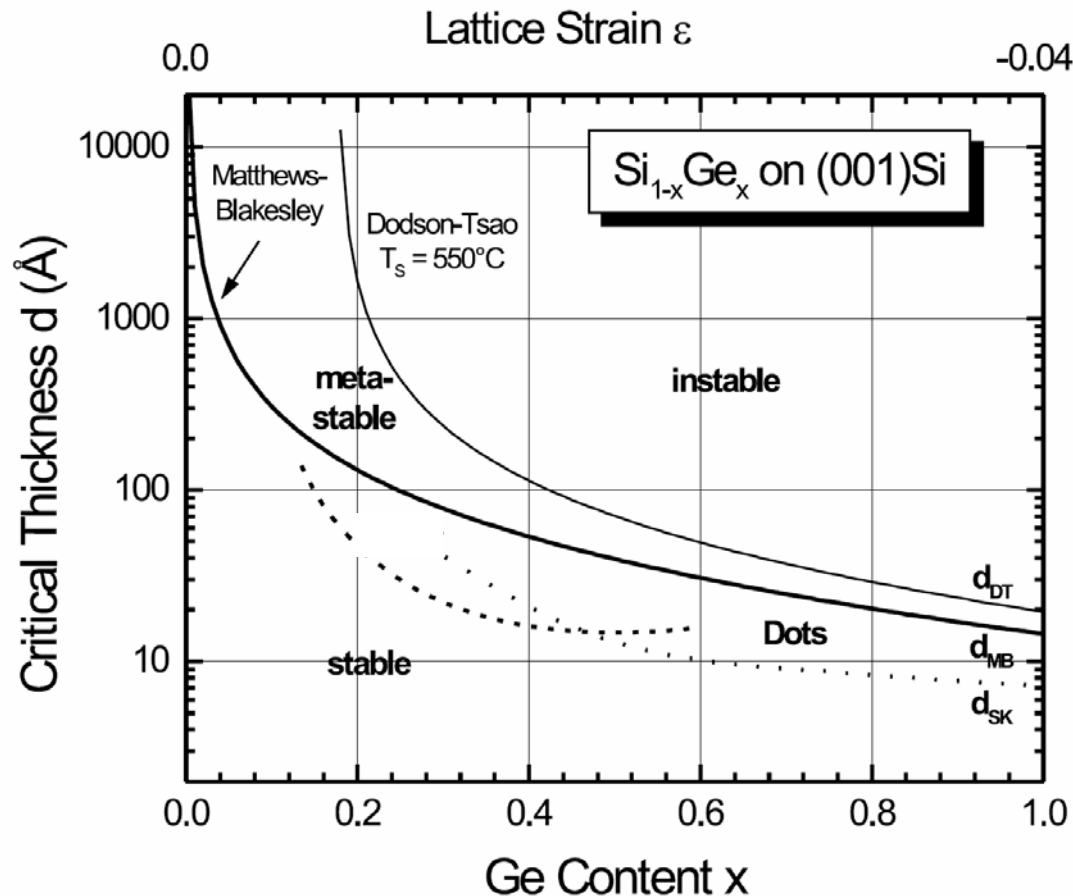
УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

СНЯТИЕ НАПРЯЖЕНИЙ – ДИСЛОКАЦИОННЫЙ И ОСТРОВКОВЫЙ РОСТ



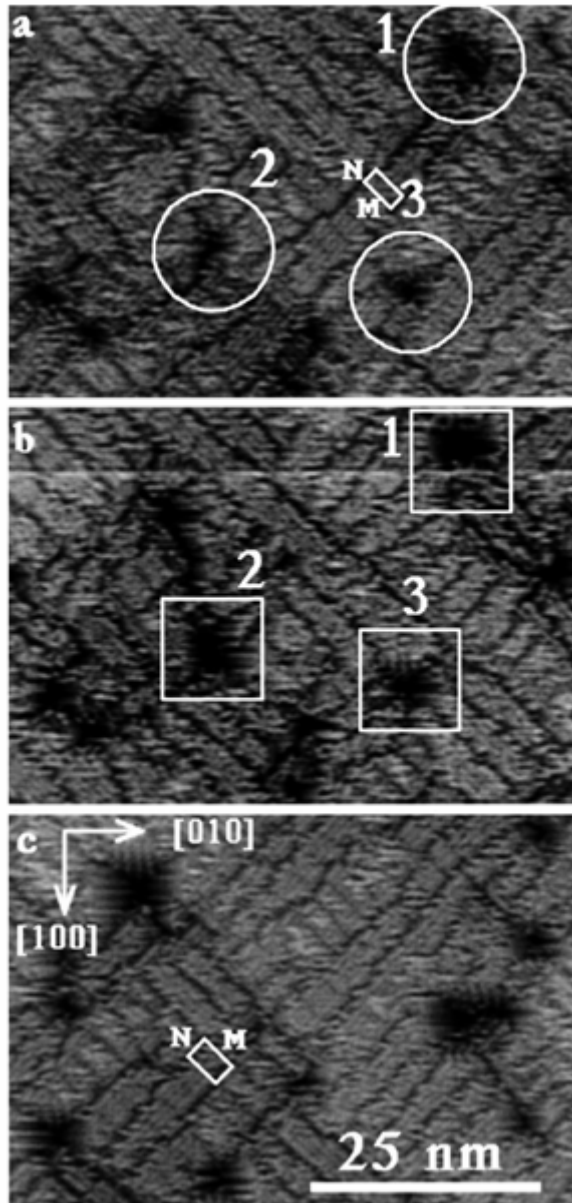
УПРУГИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ГЕТЕРОПАРЕ Ge/Si

СНЯТИЕ НАПРЯЖЕНИЙ – ДИСЛОКАЦИОННЫЙ И ОСТРОВКОВЫЙ РОСТ



Критические толщины напряженных SiGe слоев на Si(001) для релаксации через формирование дислокаций при высоких и средних температурах подложки d_{MB} и d_{DT} по расчетам Matthews and Blakesley (1974) и Dodson and Tsao (1987), соответственно.

РАЗВИТИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ

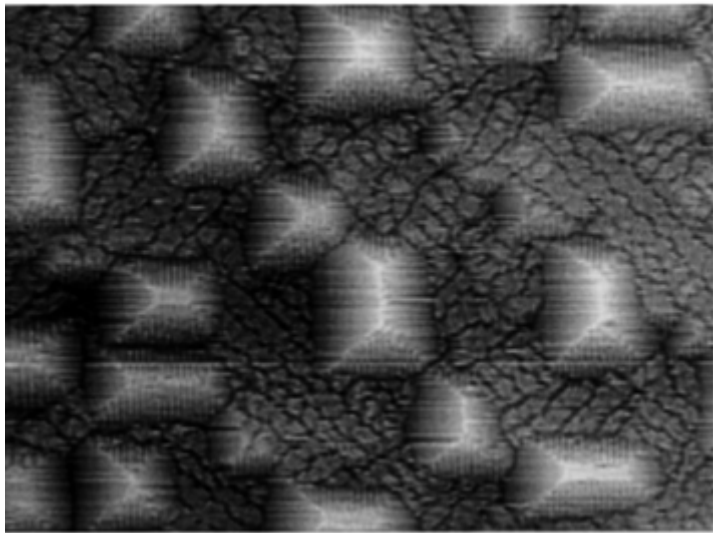


I. Goldfarb, P. T. Hayden, J. H. G. Owen,
and G. A. D. Briggs, PRL 78(20), 3959
(1997).

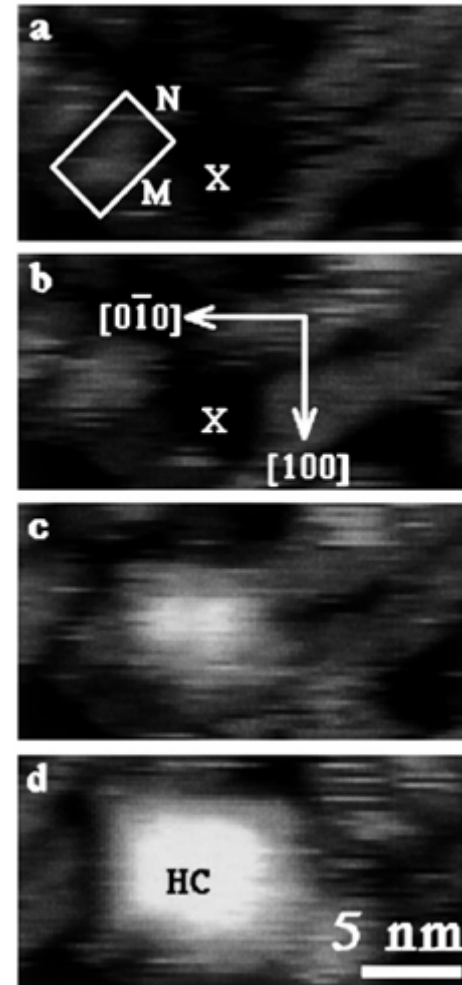
РАЗВИТИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕХОД К ОСТРОВКОВОМУ РОСТУ

зарождение островка –

реконструкция $m \times n$ и островки

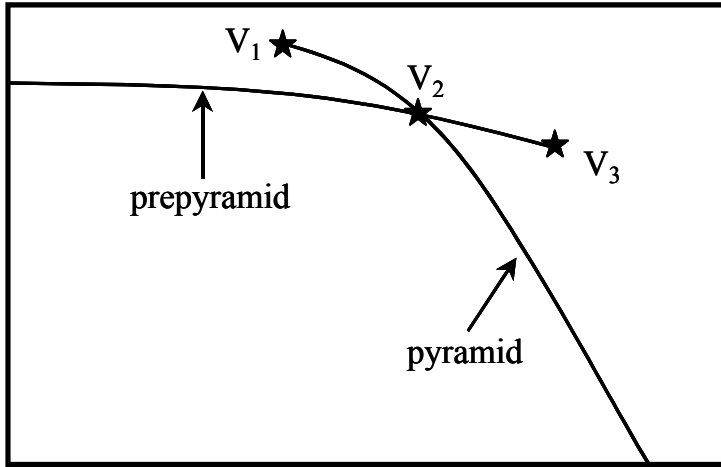


I. Goldfarb, P. T. Hayden, J. H. G. Owen,
and G. A. D. Briggs, PRL 78(20), 3959
(1997).

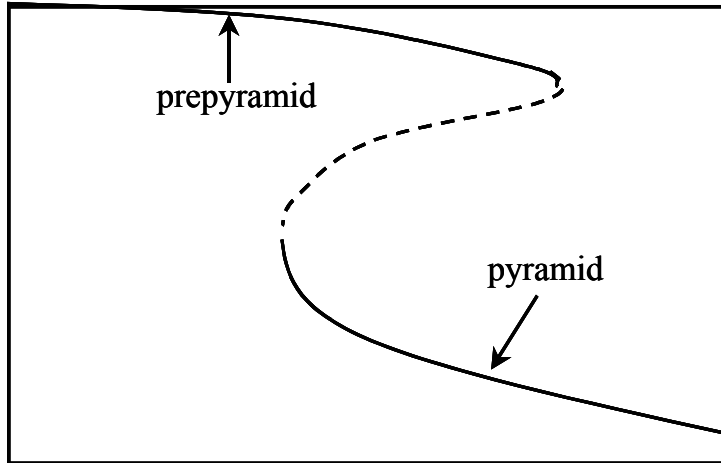


РАЗВИТИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПЕРЕХОД К ОСТРОВКОВОМУ РОСТУ

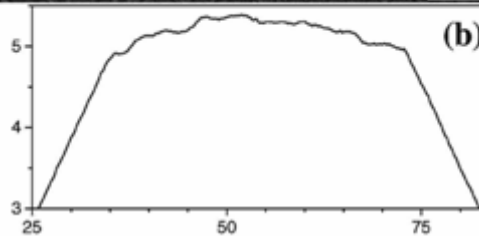
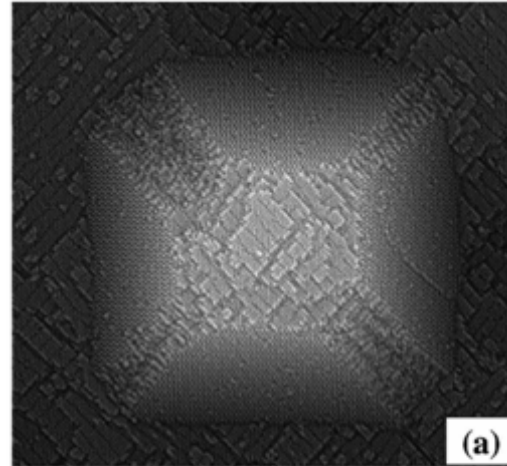
Энергия островка
объем островка



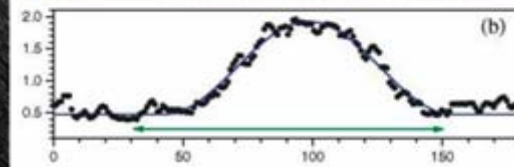
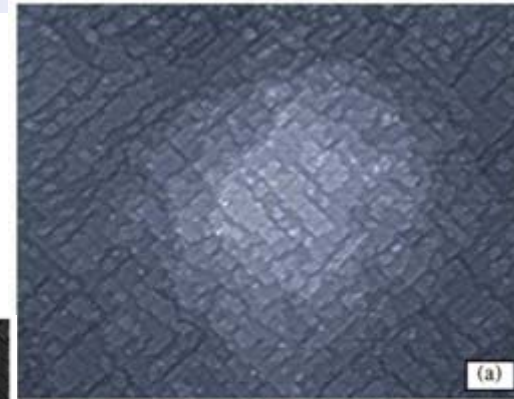
Хим. потенциал островка
объем островка



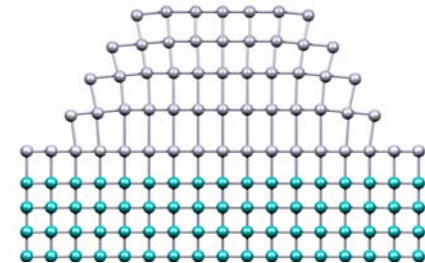
Латеральный размер островка



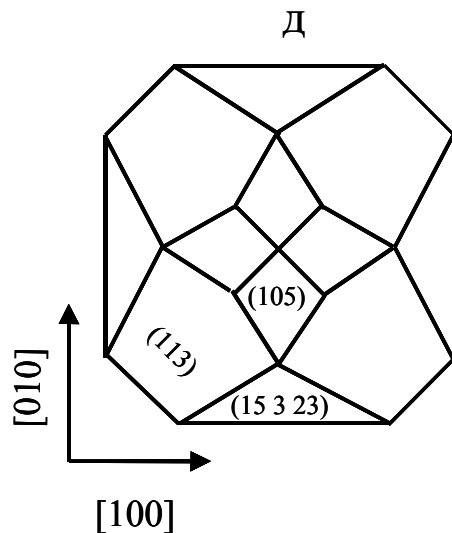
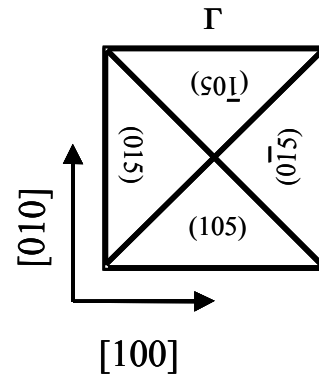
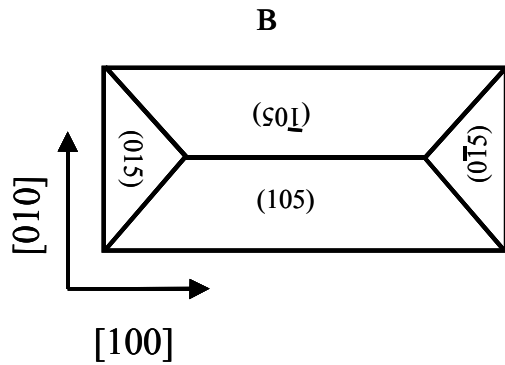
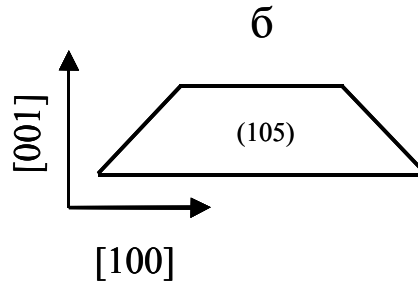
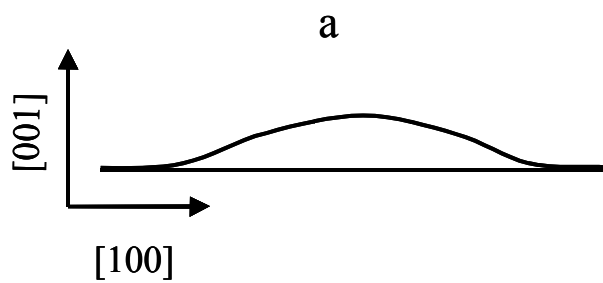
pyramid



prepyramid

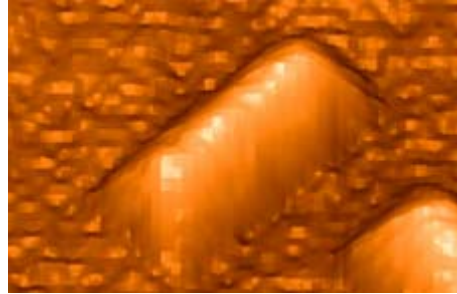
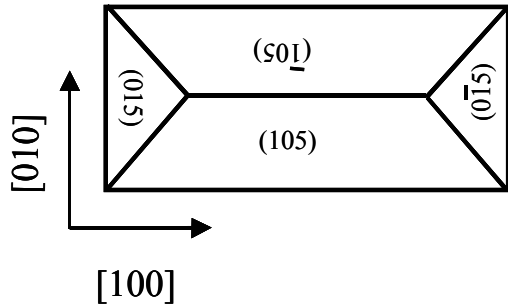


ТИПЫ Ge(Si)/Si(001) ОСТРОВКОВ



а) – предпирамида,
б) – усечённая пирамида,
в) – hut-кластер,
г) – пирамида,
д) – купол

НУТ ОСТРОВКИ



available on-line:

<http://mrgcvd.engr.wisc.edu/lagallygroup/archive/images/hut.gif>

температуры формирования

$\leq 580 \text{ }^{\circ}\text{C}$

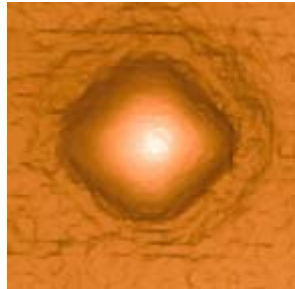
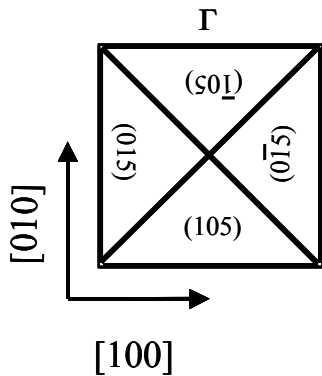
латеральные размеры

$15 \div 50 \text{ нм}$

высота

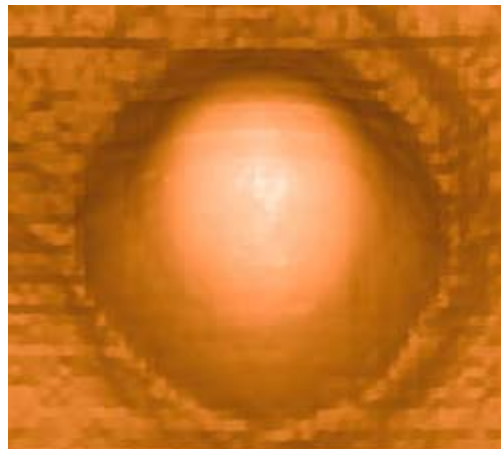
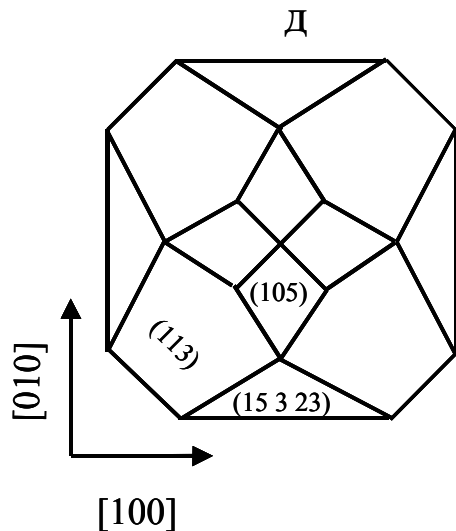
$\leq 2 \text{ нм}$

PYRAMID ОСТРОВКИ



температуры формирования любые
pyramid – островки в отличие от hut
являются стабильной формой островков
и не исчезают при отжиге

ДОМЕ ОСТРОВКИ



температуры формирования

$\geq 580 \text{ } ^\circ\text{C}$

латеральные размеры

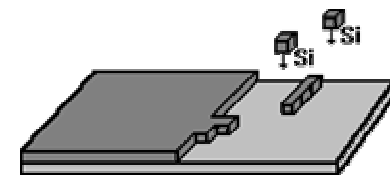
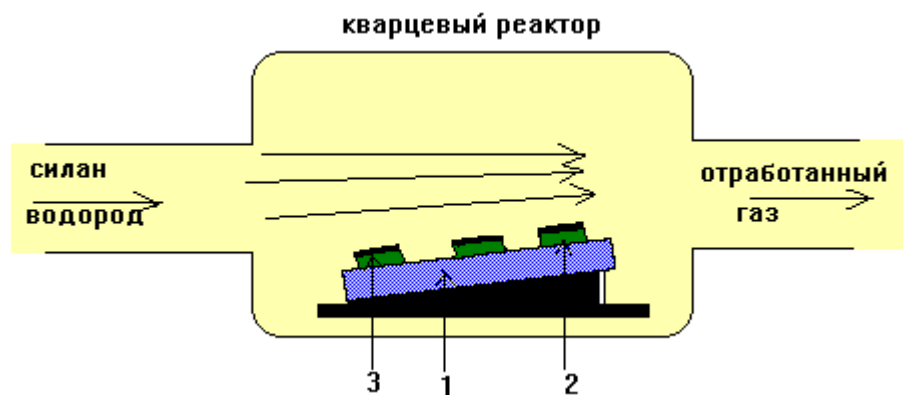
$\geq 60 \text{ нм}$

высота

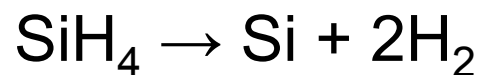
$\geq 10 \text{ нм}$

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ

ГАЗОФАЗНАЯ ЭПИТАКСИЯ



- 1 - держатель
- 2 - кремниевая пластина
- 3 - пленка



ПРЕИМУЩЕСТВА:

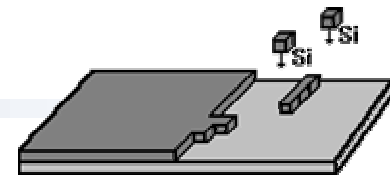
- простота оборудования
- высокие скорости роста (при высоких температурах)
- большие толщины структур
- высокая чистота структур

НЕДОСТАТКИ:

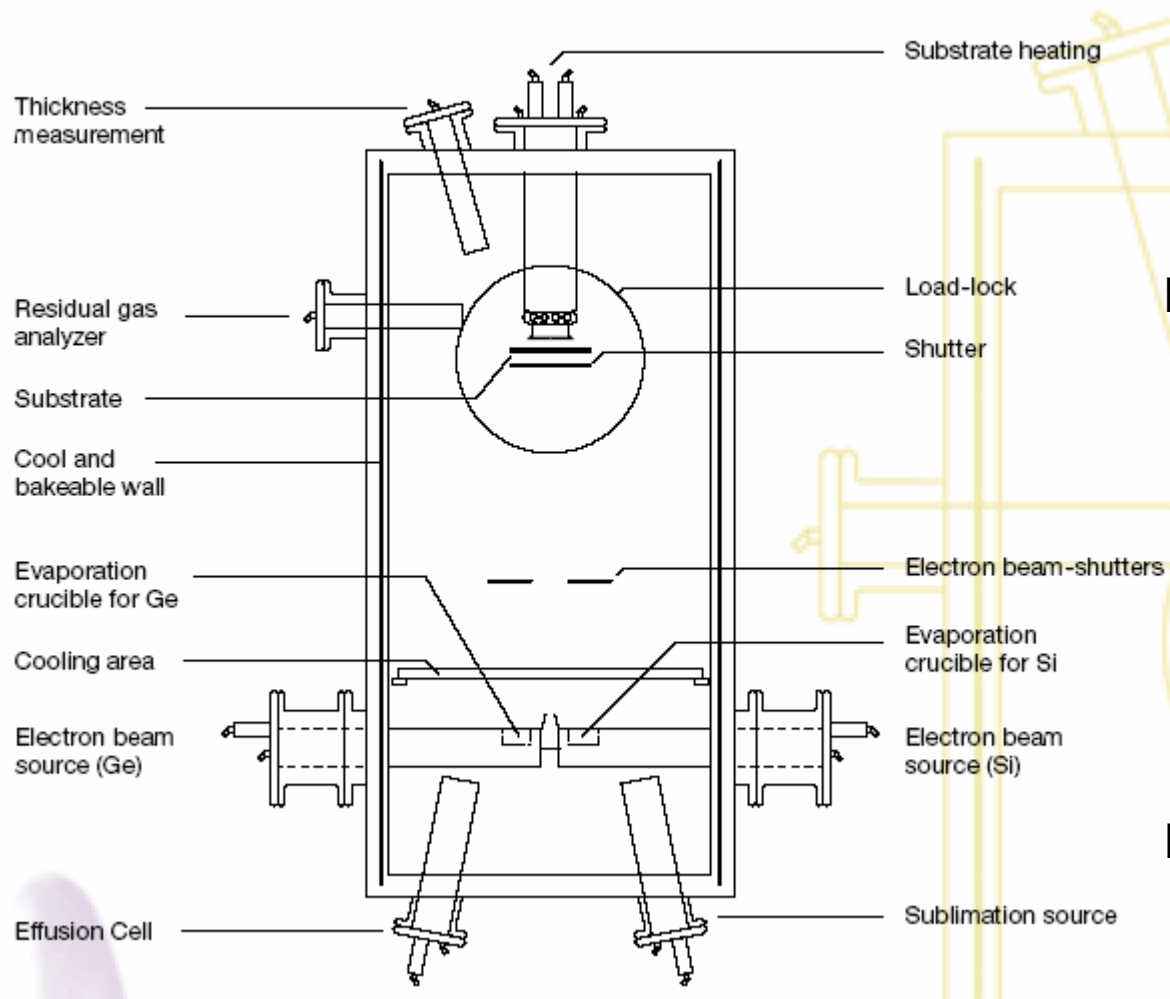
- зависимость скорости роста от температуры
- низкая резкость гетерограниц
- токсичность используемых материалов

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ РОСТ

МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВАЯ ЭПИТАКСИЯ



Molecular Beam Epitaxy System



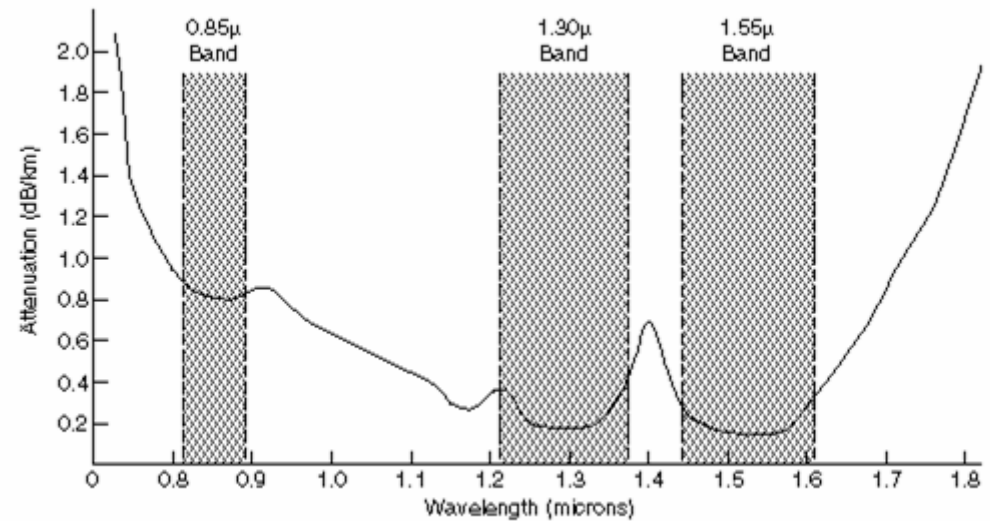
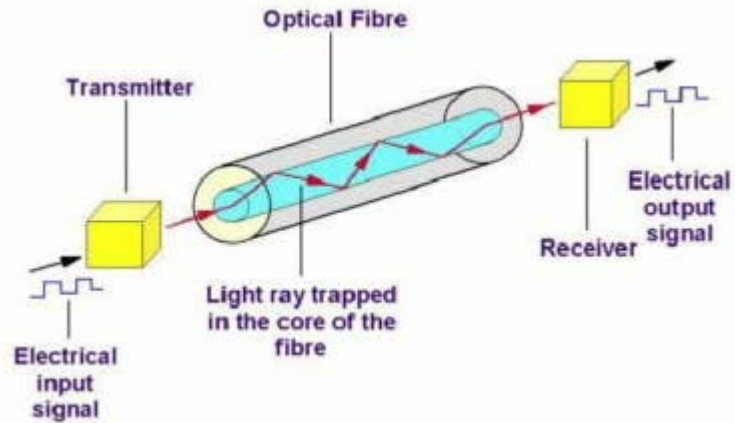
ПРЕИМУЩЕСТВА:

- резкие гетерограницы
- точный контроль количества осаждаемых материалов (возможность контроля до субмонослойных толщин)
- скорость роста не зависит от температуры

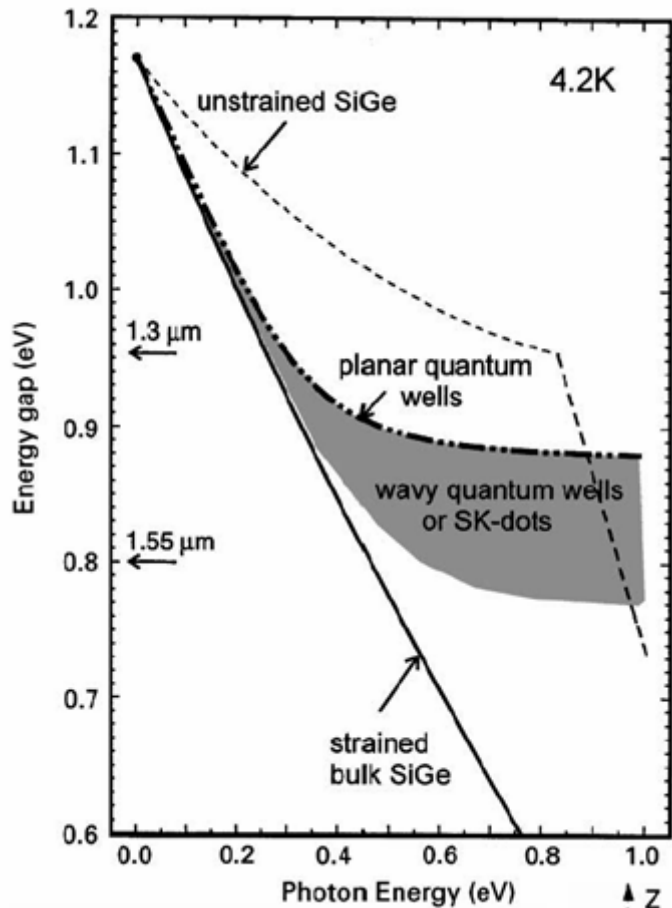
НЕДОСТАТКИ:

- сложность и высокая стоимость оборудования
- малые скорости роста
- меньшая чистота структур

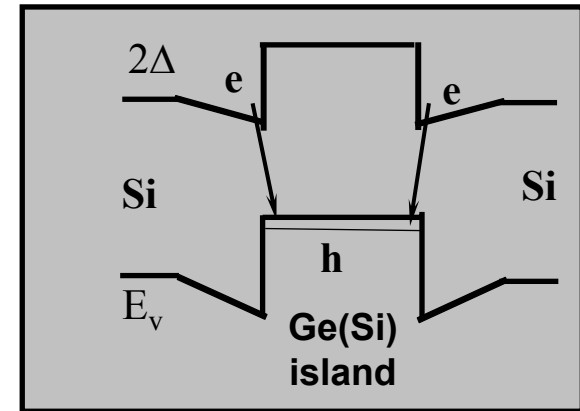
ПРИМЕНЕНИЕ СТРУКТУР С Ge(Si) ОСТРОВКАМИ



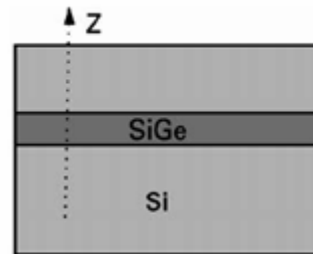
ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА



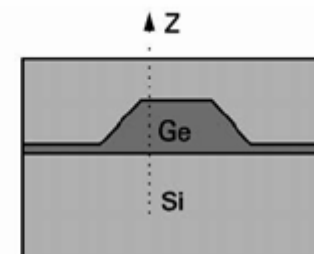
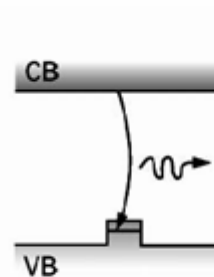
Возможность получения (в отличие от квантовых ям) оптического сигнала в области $1.55 \mu\text{m}$.



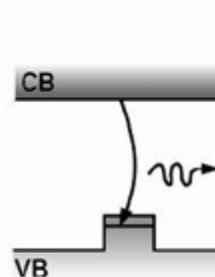
K. Eberl et al. / Physica E 9 (2001) 164-174



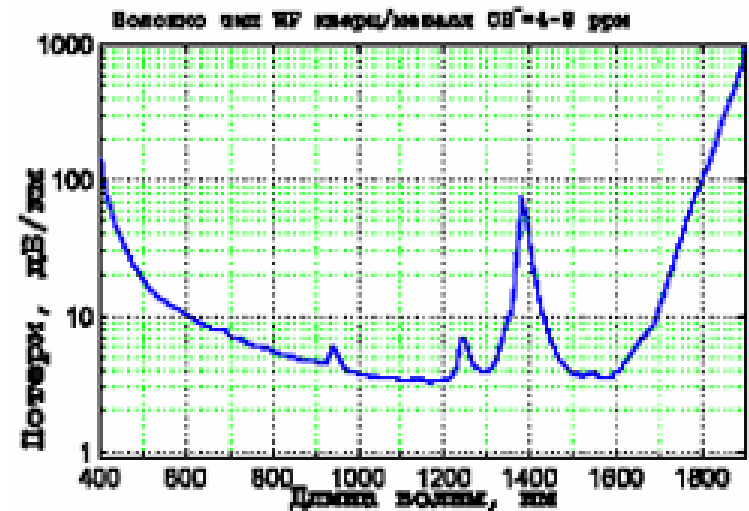
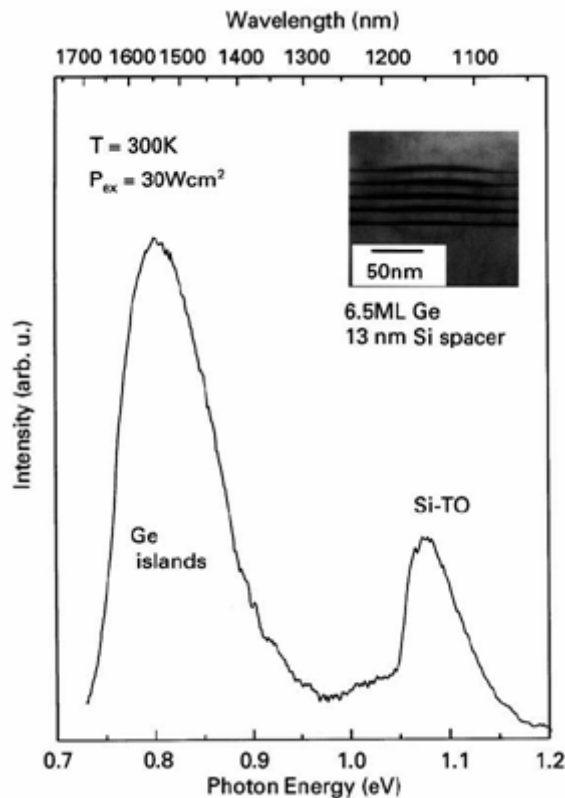
(a) Planar SiGe layer



(b) Thickness increased at island position



ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА



– сигнал фотолюминесценции при комнатной температуре от структуры с Ge(Si) самоформирующимися островками (5 слоев).

максимум сигнала – **$1.55 \mu\text{m}$**

K. Eberl et al. / Physica E 9 (2001) 164-174