

Разрешающая способность объектива совместно с ЭОП рассчитывается по формуле:

$$A' = \frac{R_{\text{эоп}} \cdot f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{эоп}}$ – разрешающая способность фотокатода ЭОП, $f'_{\text{об}}$ – фокусное расстояние объектива прибора, $f'_{\text{кол}}$ – фокусное расстояние коллиматора.

Разрешающая способность ЭОП 3 поколения составляет 60–68 штр/мм (для расчета использовали 68 штр/мм, однако с учетом снижения разрешающей способности на оптику в приборе она составляет 60 штр/мм).

Разрешающая способность ЭОП 2 поколения составляет 35–57 штр/мм (для расчета использовали 57 штр/мм, однако с учетом снижения разрешающей способности на оптику в приборе она составляет 49 штр/мм).

Фокусное расстояние объектива прибора $f'_{\text{об}} = 25,4$ мм.

Расчет разрешающей способности монокуляра при использовании ЭОП 3го поколения

$$\alpha' = \frac{R_{\text{эоп}} \cdot f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} = \frac{60 \cdot 25,4}{560} = 2,72'.$$

Расчет разрешающей способности монокуляра при использовании ЭОП 2го поколения:

$$\alpha' = \frac{R_{\text{эоп}} \cdot f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} = \frac{49 \cdot 25,4}{560} = 2,22'.$$

Отношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio, SNR) отражает способность прибора выделять полезный оптический сигнал от объекта на фоне различных шумов, возникающих в процессе преобразования, усиления и визуализации.

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{сигн}}}{P_{\text{шум}}}. \quad (3)$$

Для ЭОП 2го поколения: $\text{SNR} = \frac{2,0}{0,12} = 16,7$.

Для ЭОП 3го поколения: $\text{SNR} = \frac{2,5}{0,08} = 31,25$.

Коэффициент совершенства (Figure of Merit, FOM) – это интегральный параметр,

позволяющий количественно оценить эффективность ЭОП. Он объединяет разрешающую способность и SNR:

$$\text{FOM} = R \cdot \text{SNR}. \quad (4)$$

FOM отражает способность прибора формировать четкое изображение при слабом освещении и наличии шумов.

Для ЭОП 2го поколения: $\text{FOM} = 49 \cdot 16,7 \approx 818$.

Для ЭОП 3го поколения: $\text{FOM} = 60 \cdot 31,25 \approx 1875$.

ЭОП II поколения обеспечивают умеренное качество изображения, пригодное для наблюдения при слабом лунном или звездном освещении. Однако при освещенности ниже 0,01 лк наблюдается рост шумов и снижение детализации.

ЭОП III поколения демонстрируют высокую чувствительность, низкий уровень шумов и отличную детализацию изображения. Приборы с таким FOM способны работать в условиях полной темноты (освещенность менее 0,001 лк) и обеспечивают уверенное распознавание объектов на расстоянии до 500 м.

Параметры разрешающей способности, SNR и FOM являются фундаментальными для оценки качества ПНВ. Их совместный анализ позволяет объективно сравнивать приборы разных поколений, прогнозировать их поведение в реальных условиях и выбирать оптимальные решения для конкретных задач. Повышение FOM – ключ к созданию более надежных, чувствительных и точных приборов ночного видения будущего.

Литература

1. Грузевич, Ю. К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю. К. Грузевич. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 276 с.
2. Ришар, Ж. Характеристики систем ночного видения / Ж. Ришар. – М.: Мир, 1991. – 295 с.
3. Берковский, А. Г. Вакуумные фотоэлектронные приборы / А. Г. Берковский, В. А. Гаванин, И. Н. Зайдель. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.

УДК 535.211; 621.315.592

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В Ge/Si ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ

Гацкевич Е. И.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Проведено моделирование термостимулированной диффузии в GeSi гетероструктурах с квантовыми точками в условиях воздействия импульсами лазеров наносекундной длительности. Определены режимы частичного и полного растворения квантовых точек.

Ключевые слова: диффузия, гетероструктуры, квантовые точки, лазерный импульс, кремний, германий.

LASER-INDUCED DIFFUSION PROCESSES IN Ge/Si HETEROSTRUCTURES WITH QUANTUM DOTS

Gatskevich E. I.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Modeling of thermostimulated diffusion in GeSi heterostructures with quantum dots under conditions of irradiation by nanosecond laser pulses has been carried out. Modes of partial and complete dissolution of quantum dots were determined.

Keywords: diffusion, heterostructures, quantum dots, laser pulse, silicon, germanium.

Адрес для переписки: Гацкевич Е. И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gatskevich_elena@bk.ru

Ранее в работах [1,2] исследованы возможности модификации Ge/Si гетероструктур с квантовыми точками под действием наносекундных лазерных импульсов. В частности, в работе [1] показана возможность увеличения степени однородности параметров квантовых точек (КТ) в ансамбле при наносекундном лазерном облучении. Указанный эффект возникает вследствие плавления нанокластеров, диффузии Ge в Si, т. е. частичного или полного растворения КТ. Настоящая работа посвящена моделированию диффузионных процессов в окрестности нанокластера при наносекундном лазерном воздействии.

Для моделирования диффузионных процессов, происходящих в КТ, воспользуемся следующими приближениями.

1) Согласно данным [3] просвечивающей электронной микроскопии отношение высоты КТ к основанию равно 0,1-0,2. Учитывая, что КТ имеют сплюснутую форму, будем аппроксимировать слой с квантовыми точками $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ слоем с некоторой эффективной толщиной d_{eff} .

2) Будем считать, что концентрация Ge в слое характеризуется эффективным параметром x , причем начальная концентрация в слое C_0 равна 0,8, что соответствует экспериментальным данным [3], полученным ранее методом комбинационного рассеяния света. Отметим, что значения параметра x немодифицированных образцов определяются условиями роста КТ.

3) Температуру слоя и близлежащей области будем считать постоянной и равной некоторой величине T .

При моделировании рассмотрим три режима лазерного воздействия. В первом режиме эффективная температура слоя меньше температуры плавления объемного Ge ($T_{\text{mGe}} = 1210$ K), т. е. и германий и кремний находятся в кристаллическом состоянии, и диффузия идет в твердой фазе. Во втором режиме T выше температуры плавления объемного Si ($T_{\text{mSi}} = 1687$ K), в этой ситуации диффузия происходит в жидком состоянии. В третьем режиме T имеет промежуточное значение между температурами плавления германия и кремния. Будем считать, что в этой ситуации будут расплавлены $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ нанокластеры, а Si будет находиться в кристаллической фазе.

Время диффузии в первом режиме порядка действия лазерного импульса, во втором и третьем это время существования всей системы или нанокластера в расплавленном состоянии.

При сделанных выше предположениях диффузионную задачу можно свести к упрощенной форме и сформулировать следующим образом:

$$\frac{\partial C(z)}{\partial t} = D(T) \left(\frac{\partial^2 C(z)}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

здесь $C(z)$ – концентрация, координата z направлена перпендикулярно к слою с КТ, $D(T)$ – коэффициент диффузии Ge в Si при температуре T . Уравнения диффузии для кремния можно не записывать, поскольку концентрация кремния равна 1-С.

Учитывая распределение германия в матрице и сделанные ранее приближения, начальные и граничные условия запишем в виде:

$$C(z, t = 0) = \begin{cases} 0, & z \in [0, d_b] \\ C_0, & z \in [d_b, d_b + d_{\text{eff}}] \\ 0, & z \in [d_b + d_{\text{eff}}, d] \end{cases} \quad (2)$$

$$C|_{z=0} = 0, \quad C|_{z=d} = 0.$$

d_b соответствует глубине, на которой залегают КТ, d – толщина исследуемой гетероструктуры, d – достаточно велико по сравнению с d_{eff} .

В указанной постановке задача имеет аналитическое решение, которое может быть записано в виде:

$$C(z, t) = \frac{1}{2} C_0 \left[\text{erf} \left(\frac{d_b + d_{\text{eff}} - z}{2\sqrt{Dt}} \right) + \text{erf} \left(\frac{-d_b + d_{\text{eff}} + z}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]. \quad (3)$$

Согласно литературным данным [4] коэффициент диффузии жидкого Ge в расплаве Si $D = 2,5 \cdot 10^{-4}$ см²/с. Длина диффузии L_d за время t равна $\sqrt{Dt}$. Если считать, что время существования расплавленной фазы ~ 100 нс, то $L_d \approx 50$ нм, что намного превышает размеры КТ по высоте. Это означает, что при плавлении кремниевой матрицы происходит полное растворение КТ.

Коэффициент диффузии в твердой фазе на несколько порядков меньше. Диффузия описывается формулой:

$$D(T) = D_0 e^{-\frac{E_a}{k_B T}},$$

где D_0 – некоторая постоянная, E_a – энергия активации диффузии, k_B – постоянная Больцмана. Согласно экспериментальным данным значения коэффициента диффузии от комнатной температуры и до температуры плавления меняются от 10^{-15} до 10^{-11} см²/с, длина диффузии L_d при $t = 100$ нс при этом меняется от 0,0001 до 0,01 нм, что намного меньше размера КТ.

Для третьего режима моделирование диффузии Ge в слое с КТ и в его окрестности с течением времени проводилось для $D = 2,5 \cdot 10^{-8}$ см²/с. Рассматривались режимы облучения, при которых КТ находятся в расплавленном состоянии от 40 до 500 нс. Растворением слоя КТ будем считать состояние, когда концентрация Ge в слое уменьшилась в два раза ($x = 0,4$). Скорость диффузионных процессов (растворение слоя) зависит от толщины слоя. Увеличение толщины слоя ведет

к замедлению процесса растворения. Так при толщине слоя 2 нм за время 160 нс концентрация Ge в центре слоя достигает величины 0,58, для слоя толщиной 4 нм эта величина составляет только 0,78.

Временные изменения концентрации Ge в центре слоя и на расстоянии 4 нм от него показаны на рисунке 1. Видно, что для растворения германиевого слоя в кремнии необходимы достаточно большие времена нахождения слоя в расплавленном состоянии. Для слоя толщиной 2 нм это время приближается к 500 нс, для 4 нм время растворения значительно больше.

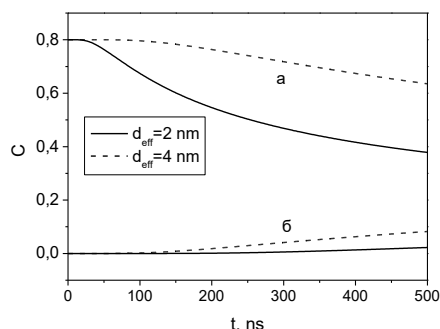


Рисунок 1 – Временные зависимости концентрации Ge в центре (а) и в окрестности (б), расстоянии от центра слоя 4 нм) слоя КТ с указанными значениями эффективной толщины слоя

В ситуации с КТ имеется ряд факторов, которые повышают скорость диффузионных процессов. Один из них - малость размеров КТ, что приводит к изменению поверхностной энергии на границе КТ – объемный Si. Другим фактором является повышенная концентрация вакансий вблизи и в самой КТ, что увеличивает вероятность перескоков атомов при диффузии.

Проведено теоретическое исследование лазерно-индуцированных процессов массопереноса в гетероструктурах с квантовыми точками. Установлены режимы, при которых импульсное лазерное воздействие приводит к растворению квантовых точек.

Литература

1. Effect of pulsed laser action on hole energy spectrum of Ge/Si self-assembled quantum dots / A. I. Yakimov [et al.] // Physical Review B. – 2005. – № 11. – Art. 115318.
2. Модификация квантовых точек в Ge-Si наноструктурах при импульсном лазерном воздействии / А. В. Двуреченский [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук. – 2006. – № 2. – С. 74–78.
3. Raman scattering diagnostics of as grown and pulsed laser modified Ge-Si nanostructures with quantum dots / E. I. Gatskevich [et al.] // Proceedings of SPIE. – 2007. – Vol. 6728. – Art. 67281U.
4. All laser-assisted heteroepitaxial growth of Si_{0.8}Ge_{0.2} on Si (100): Pulsed laser deposition and laser induced melting solidification / R. Serna [et al.] // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 68. – P. 1781–1783.

УДК 535.327, 535.012

ТЕРМИЧЕСКАЯ ЛИНЗА В АКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ KY(WO₄)₂ И KYb(WO₄)₂

Герцова А. В., Юмашев К. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы оптическая сила и астигматизм термической линзы в лазерных активных элементах из кристаллов KY(WO₄)₂ и KYb(WO₄)₂ различной вырезки для случая продольной накачки. Определены атермальные вырезки активных элементов из данных кристаллов, при которых термическая линза отсутствует или же является положительной с низким астигматизмом.

Ключевые слова: кристаллы двойных вольфраматов, термическая линза, атермальные направления.

THERMAL LENSING IN LASER ACTIVE ELEMENTS BASED ON KY(WO₄)₂ AND KYb(WO₄)₂ CRYSTALS

Hertsova A. V., Yumashev K. V.

Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. The optical power and astigmatism of the thermal lens in laser active elements made of KY(WO₄)₂ and KYb(WO₄)₂ crystals of different cuttings for the case of end pumping are studied. Athermal cuttings of active elements from these crystals are determined, in which the thermal lens is absent or is positive with low astigmatism.

Keywords: double tungstates, thermal lensing, athermal directions.

Адрес для переписки: Юмашев К. В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kuyumashev@bntu.by

В настоящей работе исследована термическая линза (ТЛ), возникающая в лазерных активных элементах (ЛАЭ) из кристаллов KY(WO₄)₂ (KYW) и KYb(WO₄)₂ (KYbW) различной вырезки для случая продольной накачки и предложены атермальные направления (AD) для данных ЛАЭ.

Кристаллы KYW и KYbW, активированные ионами редких земель (Yb, Er, Tm), являются эффективными лазерными активными средами, генерирующими в ближней ИК области спектра [1–5].

Рассмотрены три вырезки кристаллов, при которых свет (с длиной волны 1,06 мкм)