

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТОМОВ В ПЛЕНКАХ SiO₂, ИМПЛАНТИРОВАННЫХ ИОНАМИ In⁺ И As⁺

И.Е. Тыщенко¹⁾, Ч. Сы^{1), 2)}, С.Г. Черкова¹⁾, В.П. Попов¹⁾

¹⁾Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова,
пр. Лаврентьева 13, Новосибирск, Россия,

tys@isp.nsc.ru; cherkova@isp.nsc.ru; popov@isp.nsc.ru

²⁾Новосибирский государственный университет,

ул. Пирогова 2, Новосибирск, Россия, amaoshihaomao@gmail.com

Исследована фотолюминесценция при комнатной температуре пленок SiO₂, имплантированных ионами In⁺ и As⁺ в зависимости от параметров ионов, температуры последующего отжига и энергии возбуждающего излучения. Использовались ионы As⁺ с энергией 40, 80 или 135 кэВ и ионы In⁺ с энергией 50 кэВ, так что соотношение пробега ионов R_p^{As}/R_p^{In} составляло 1, 2 или 3 соответственно. Последующий отжиг проводился при температуре 900-1100 °С в течение 30 мин в атмосфере N₂. Спектры фотолюминесценции возбуждались при комнатной температуре излучениями лазера с длиной волны $\lambda_{ex} = 442$ и 473 нм. В спектрах фотолюминесценции при возбуждении с $\lambda_{ex} = 473$ нм наблюдался пик 550 нм, энергетическое положение которого смещалось к 520-530 нм при $\lambda_{ex} = 442$ нм. Увеличение соотношения R_p^{As}/R_p^{In} сопровождалось уменьшением интенсивности фотолюминесценции, а также изменением соотношения интенсивности пиков в зависимости от температуры отжига. Наблюдаемый эффект объясняется влиянием размерного квантования на излучательную рекомбинацию электронов и дырок в нанокристаллах InAs.

Ключевые слова: ионная имплантация; SiO₂; InAs; нанокристаллы; фотолюминесценция; квантово-размерный эффект.

PHOTOLUMINESCENCE AND ATOM PROFILES IN THE In⁺ AND As⁺ CO-IMPLANTED SiO₂ FILMS

I.E. Tyschenko¹⁾, Zh. Si^{1), 2)}, S. Cherkova¹⁾, V.P. Popov¹⁾

¹⁾A.V. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics, 13 Lavrentyev Ave., Novosibirsk, Russia,
tys@isp.nsc.ru; cherkova@isp.nsc.ru; popov@isp.nsc.ru

²⁾Novosibirsk State University, 2 Pirogov Str., Novosibirsk, Russia, amaoshihaomao@gmail.com

The room-temperature photoluminescence of the In⁺ and As⁺ ion-implanted SiO₂ films was studied as a function of the In⁺ and As⁺ ion energy, the annealing temperature and the photoluminescence excitation energy. As⁺ ions with an energy of 40, 80 or 135 keV to the respective dose of 6×10^{15} cm⁻², 9×10^{15} cm⁻² or 1×10^{16} cm⁻² and In⁺ ions with an energy of 50 keV to the dose of 4×10^{15} cm⁻² were used. The ion implantation parameters produced Gauss-like In atom distribution with the peak concentrations ~ 1.5 at.% at a depth of about 32 nm below the top surface. The same atom concentration peaks were formed by As⁺ ions at a depth of 32 nm, 56 nm and 90 nm, respectively. Thus, the ion range ratio (R_p^{As}/R_p^{In}) was about 1, 2 or 3, respectively. The subsequent annealing was carried out at a temperature of 900-1100 °C for 30 minutes in the N₂ atmosphere. The photoluminescence (PL) spectra were excited at room temperature by the laser excitation wavelength of $\lambda_{ex} = 442$ and 473 nm. The PL peak at 550 nm was detected in the emission spectra excited by $\lambda_{ex} = 473$ nm. As the excitation wavelength decreased to 442 nm, the PL peak position shifted to 520-530 nm. An increase in the R_p^{As}/R_p^{In} ratio was accompanied by a decrease in the PL intensity, as well as a change in the peak intensity ratio depending on the annealing temperature. The observed effect is explained by the effect of dimensional quantization on the radiative recombination of electrons and holes in InAs nanocrystals. In the frame of the effective mass model, the quantization energy values of about 2.12 eV and 1.90 eV, as well as the nanocrystal sizes of 1.6 and 1.8 nm, were estimated from the PL peaks.

Keywords: ion implantation; SiO₂; InAs; nanocrystals; photoluminescence; quantum-size effect.

Введение

Модифицирование свойств оксида кремния, одного из важнейших диэлек-

триков кремниевой электроники, привлекает все большее внимание исследователей с целью расширения области его при-

менения в фотовольтаике, а также для создания биосенсоров на основе ионно-чувствительных полевых транзисторов. Модифицирование свойств оксида кремния с помощью внедрения наночастиц с высокой диэлектрической проницаемостью рассматривается как один из путей расширения области его применения в электронике. В настоящей работе изучена фотолюминесценция (ФЛ) при комнатной температуре пленок SiO₂, имплантированных ионами As⁺ и In⁺, в условиях ионного синтеза нанокристаллов InAs.

Методика эксперимента

Пластина кремния, термически окисленная на толщину SiO₂ около 280 нм, была имплантирована ионами In⁺ с энергией 50 кэВ дозой 4×10^{15} см⁻² и ионами As⁺ с энергией 40, 80 или 135 кэВ соответствующими дозами 6×10^{15} , 9×10^{15} или 1×10^{16} см⁻². При использованных энергиях ионов соотношение средних проективных пробегов ионов As⁺ и In⁺ R_p^{As}/R_p^{In} составляло 1, 2 или 3 соответственно. Концентрация имплантированных атомов на глубине средних пробегов ионов была около ~1.5 - 2 ат.%. Последующий отжиг проводился в потоке паров N₂ при температуре 900-1100°C в течение 30 мин. Перед отжигом слои SiO₂ были покрыты пленкой Si₃N₄. Спектры ФЛ возбуждались при комнатной температуре излучениями лазера с длиной волны 442 и 473 нм. Распределение атомов In и As до и после отжига исследовалось методом спектрометрии резерфордского обратного рассеяния (ROR). В качестве зондирующего пучка использовались ионы He⁺ с энергией 1.7 МэВ в режиме максимального отклонения от направления каналирования («random»). Профили атомов индия и мышьяка рассчитывались из спектров ROR с помощью программы RUMP.

Результаты и их обсуждение

Исследование атомных профилей в зависимости от температуры отжига показало, что атомы мышьяка остаются прак-

тически неподвижными вплоть до температуры отжига 1000 °С. Заметная диффузия As наблюдается лишь при температуре 1100 °С.

Диффузия атомов In, наоборот, демонстрирует сильную зависимость как от температуры отжига, так и от наличия атомов As. На рис. 1 показаны профили атомов In в пленках SiO₂, имплантированных ионами As⁺ с энергией 40 кэВ (рис. 1а), 80 кэВ (рис. 1б) и 135 кэВ (рис. 1с) до и после отжига при температурах 900 и 1100 °С. Из рисунка видно, что после отжига при T=900 °С атомы In диффундируют в глубь пленки SiO₂, независимо от пространственного распределения атомов As.

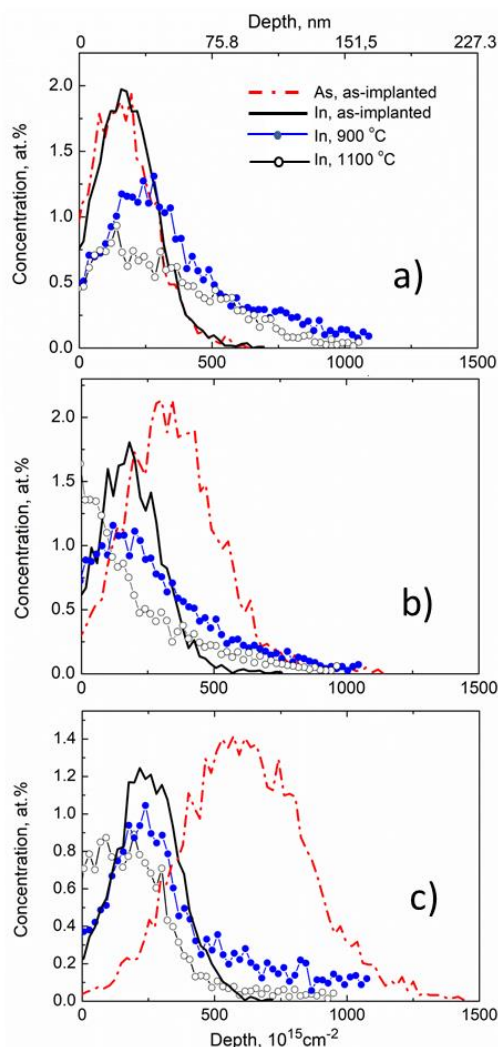


Рис. 1. Профили атомов As и In в пленках SiO₂, имплантированных ионами As⁺ с энергией 40 кэВ (а), 80 кэВ (б) и 135 кэВ (с) до и после отжига при температурах 900 и 1100 °С

Увеличение температуры отжига до 1100 °С сопровождается смещением максимума распределения In к поверхности в том случае, когда максимум распределения атомов As находился глубже максимума распределения In. При этом наблюдалось уменьшение интегральной концентрации In, обусловленное его испарением из образца. В том случае, когда профили атомов In и As совпадали, заметного смещения атомов In к поверхности не наблюдалось, хотя небольшое уменьшение его интегральной концентрации также происходило.

На рис. 2 представлены спектры ФЛ пленок, имплантированных ионами As⁺ с разными энергиями и ионами In⁺ с энергией 50 кэВ, после отжига при температуре 900 °С. Длина волны возбуждающего излучения составляла 473 нм (рис. 2а) и 442 нм (рис. 2б). Из рисунка видно, что увеличение расстояния между максимумами распределения атомов In и As сопровождается падением интенсивности ФЛ. При этом заметного смещения максимума ФЛ не наблюдается. Уменьшение длины волны возбуждающего излучения до 442 нм сопровождается, во-первых, голубым смещением максимума ФЛ, во-вторых, изменением соотношения интенсивности ФЛ для образцов, в которых соотношение R_p^{As}/R_p^{In} составляло 1 и 2. При этом для пленок, в которых средние проективные пробеги ионов In⁺ и As⁺ совпадали, голубое смещение максимума ФЛ больше, чем в случае пленок с разнесенными по глубине профилями индия и мышьяка. Этот эффект требует более глубокого изучения. Однако, в любом случае смещение максимума ФЛ указывает на прямую рекомбинацию электронов и дырок, квантово-ограниченных в нанокристаллах InAs, формирующихся в процессе отжига. Значения энергии квантования, оцененные из спектров ФЛ, составляют 1.90 и 2.12 эВ соответственно для длин волн возбуждения 473 и 442 нм. Эти зна-

чения соответствуют размерам нанокристаллов InAs 1.8 и 1.6 нм.

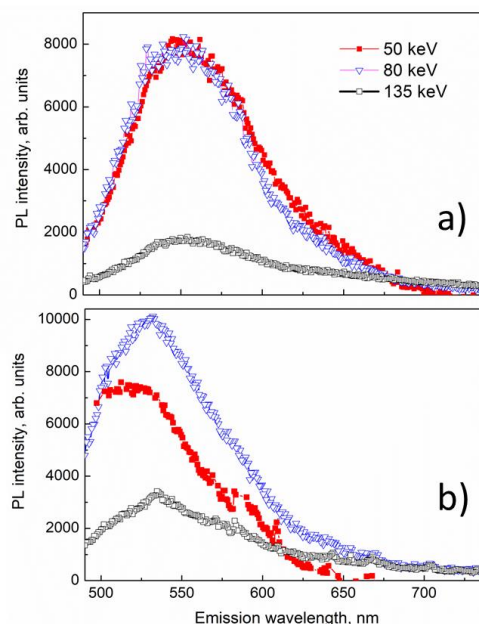


Рис. 2. Спектры ФЛ пленок SiO₂, имплантированных ионами As⁺ с энергией 40, 80 и 135 кэВ после отжига при температуре 900 °С. Длина волны возбуждения ФЛ (а) 473 нм и (б) 442 нм

Закключение

Исследованы профили атомов и ФЛ при комнатной температуре в пленках SiO₂, имплантированных ионами In⁺ и As⁺ в зависимости от температуры отжига. В экспериментах соотношение пробегов ионов As⁺ и In⁺ R_p^{As}/R_p^{In} изменялось от 1 до 3. При отжиге в интервале 900-1100 °С распределение атомов In определялось пространственным распределением атомов As. В спектрах ФЛ наблюдалась полоса эмиссии с максимумом около 550 нм при возбуждении с длиной волны 473 нм. Интенсивность ФЛ после отжига при T = 900 °С падала в 4 раза с увеличением R_p^{As}/R_p^{In} от 1 до 3. Уменьшение длины волны возбуждения ФЛ до 442 сопровождалось голубым смещением максимума ФЛ и изменением соотношения интенсивностей ФЛ для разных значений R_p^{As}/R_p^{In} . Природа наблюдаемой ФЛ объясняется прямой рекомбинацией электронов и дырок, локализованных в объеме нанокристаллов InAs с размерами 1.6-1.8 нм.