

Выращивание эпитаксиальных слоев кремния, легированных бором, с использованием трихлорсилана и диборана

О. Ю. Наливайко, К. В. Рудницкий, А. В. Шамплет

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Беларусь,
e-mail: onalivaiko@integral.by*

Проведено исследование процесса эпитаксиального наращивания слоев кремния, легированных бором, в низкопрофильном горизонтальном реакторе с плоским подложкодержателем в системе $\text{SiHCl}_3\text{-H}_2\text{-B}_2\text{H}_6$. Определены режимы, обеспечивающие формирование пленок кремния со скоростью роста 1,0 – 2,0 мкм/мин и однородностью толщины не хуже $\pm 2,0$ %. Показано, что с точки зрения управляемости процессом по концентрации бора целесообразно проводить наращивание слоев кремния при температуре не выше 1060 °C.

Ключевые слова: эпитаксиальные слои кремния; трихлорсилан; диборан.

Epitaxial growth of boron doped silicon layers using trichlorosilane and diborane

O. Y. Nalivaiko, K. V. Rudnitsky, A. V. Shamplet

*JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company, Minsk, Belarus
e-mail: onalivaiko@integral.by*

The epitaxial growth of boron-doped silicon layers in a $\text{SiHCl}_3\text{-H}_2\text{-B}_2\text{H}_6$ system using a low-profile horizontal reactor with a flat substrate holder was studied. Silicon epitaxial growth regimes were determined that ensure the formation of epitaxial silicon films with a growth rate of 1.0 to 2.0 $\mu\text{m}/\text{min}$ and the thickness uniformity less than $\pm 2,0$ %. It was shown that, in terms of process controllability based on boron concentration, it is advisable to grow epitaxial silicon layers at temperatures no higher than 1060°C.

Keywords: epitaxial silicon layers, trichlorosilane, diborane.

Введение

Использование слаболегированных эпитаксиальных слоев кремния на сильнолегированной кремниевой подложке позволяет получить ряд преимуществ при создании КМОП интегральных схем, такие как более низкая диффузионная емкость, лучшее сохранение заряда и существенное улучшение защиты от «защелки» [1, 4]. Для формирования эпитаксиальных слоев кремния в настоящее время широко используется трихлорсилан, который обеспечивает высокую скорость осаждения и является относительно недорогим [1–4].

Настоящая работа посвящена исследованию процесса эпитаксиального наращивания слоев кремния, легированных бором, с использованием трихлорсилана и диборана для создания КМОП интегральных схем на пластинах диаметром 200 мм.

1. Методика проведения эксперимента

Наращивание эпитаксиальных пленок кремния проводилось в низкопрофильном горизонтальном реакторе с плоским вращающимся подложкодержателем (pancake susceptor) при атмосферном давлении. Для нагрева подложек используется индукционный метод с радиационным отражением, при этом катушка индуктора расположена вне реактора. Схема установки представлена на рис. 1.

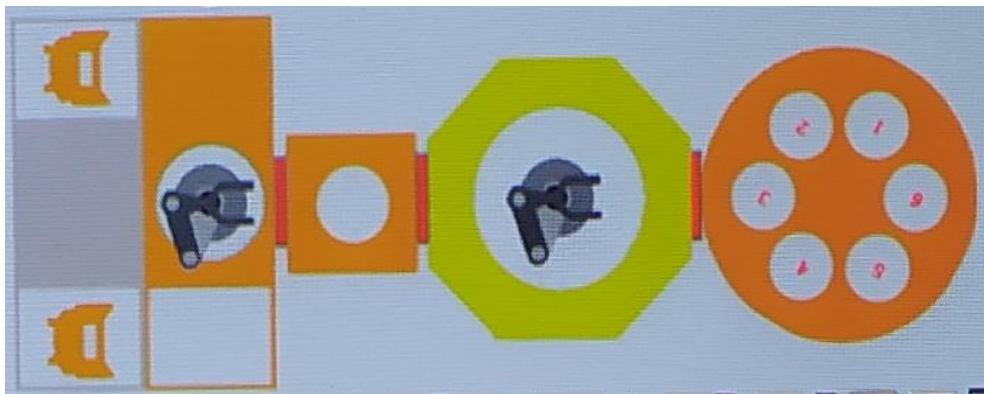


Рис. 1. Схема горизонтального реактора с плоским подложкодержателем

В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния 725КДБ0,01 с ориентацией (100) диаметром 200 мм. В качестве реагентов использовались трихлорсилан марки 4N, водород марки 5N и смесь газовая диборана с водородом с концентрацией диборана 0,004 %. Температура осаждения варьировалась в диапазоне 1020–1100 °С.

Контроль толщины эпитаксиальных пленок кремния проводился методом инфракрасной Фурье спектроскопии, а измерение удельного сопротивления четырехзондовым методом. Для контроля удельного сопротивления использовались подложки 725КЭС0,01 с ориентацией (100) диаметром 200 мм.

2. Экспериментальные результаты и обсуждение

Зависимости скорости роста эпитаксиальной пленки кремния от температуры и от потока смеси ТХС/ H_2 представлены на рис. 2 и рис. 3. Как видно из рис. 2, при увеличении температуры роста от 1020 до 1100 °С скорость роста изменяется незначительно от 1,98 до 2,15 мкм/мин или при изменении температуры на 1 °С скорость роста изменяется на 0,002 мкм/мин. То есть скорость роста слабо зависит от температуры. При увеличении потока смеси ТХС/ H_2 от 5,0 до 15 л/мин скорость роста монотонно (линейно) возрастает от 1,05 до 2,09 мкм/мин (рис. 3) или при изменении потока смеси ТХС/ H_2 на 1 л/мин скорость изменяется на 0,1 мкм/мин. Данные зависимости подтверждают, что процесс находится в режиме с диффузионным контролем, т. е. процессы массопереноса ограничивают скорость роста количеством подводимых к поверхности подложки реагентов [1, 5], при этом температура не оказывает влияния на скорость роста, что характерно для процессов эпитаксиального наращивания кремния.

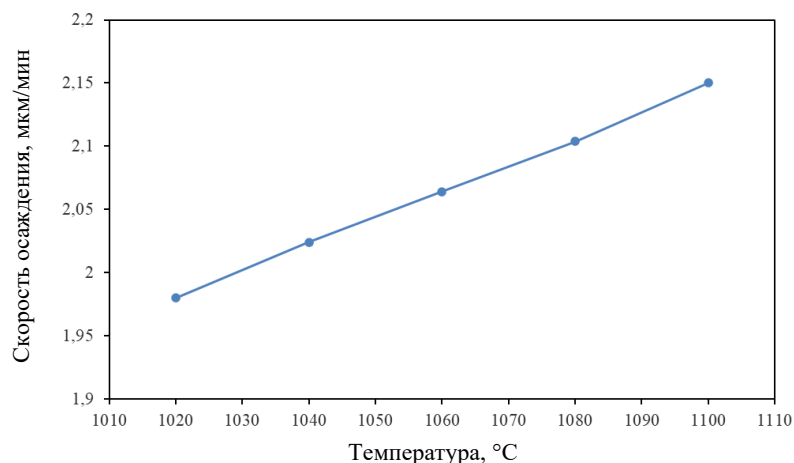


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения от потока температуры

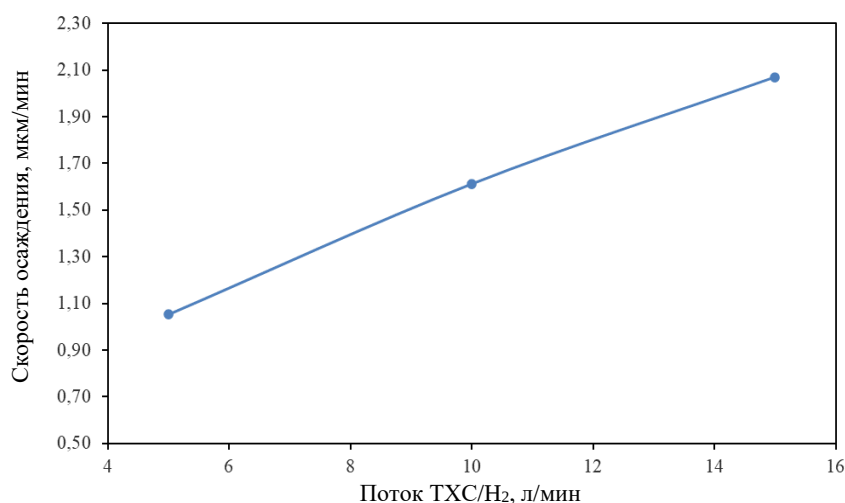


Рис. 3. Зависимость скорости осаждения от потока трихлорсилана при температурах 1200 °C

Что касается однородности толщины эпитаксиальных пленок, однородность толщины по пластине не превышала $\pm 1,2$ %, а однородность толщины по загрузке $\leq \pm 2,0$ %.

Таким образом, в исследованном диапазоне потоков смеси ТХС/Н₂ обеспечивается наращивание эпитаксиальной пленки кремния со скоростью от 1,0 до 2,0 мкм/мин, что обеспечивает высокую производительность оборудования. Увеличение скорости роста свыше 2,0 мкм/мин не исследовалось, так как увеличение скорости роста приводит к уменьшению уровня легирования в эпитаксиальном слое из-за нарушения равновесия между твердой и газообразной фазой [1, 5].

Зависимости концентрации бора в эпитаксиальных слоях кремния от концентрации диборана в газовой смеси и температуры осаждения представлены на рис. 4 и рис. 5.

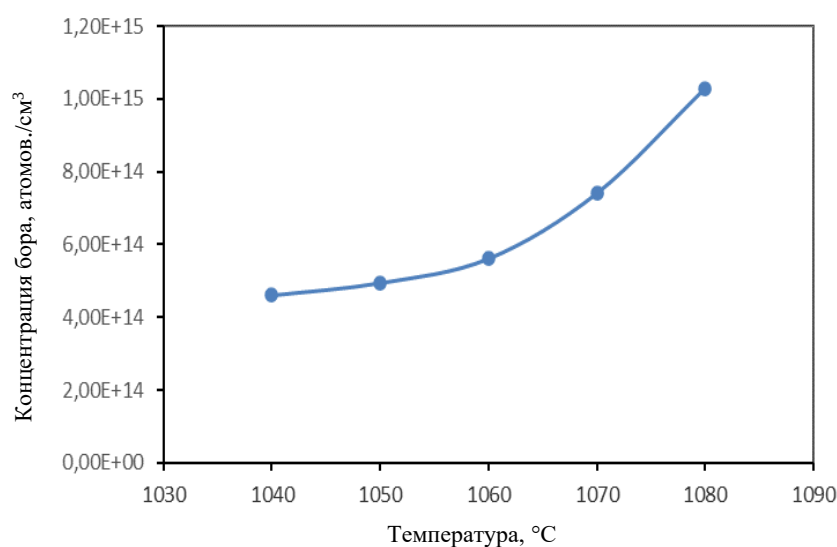


Рис. 4. Зависимость концентрации бора в эпитаксиальной пленке от концентрации диборана в газовой смеси

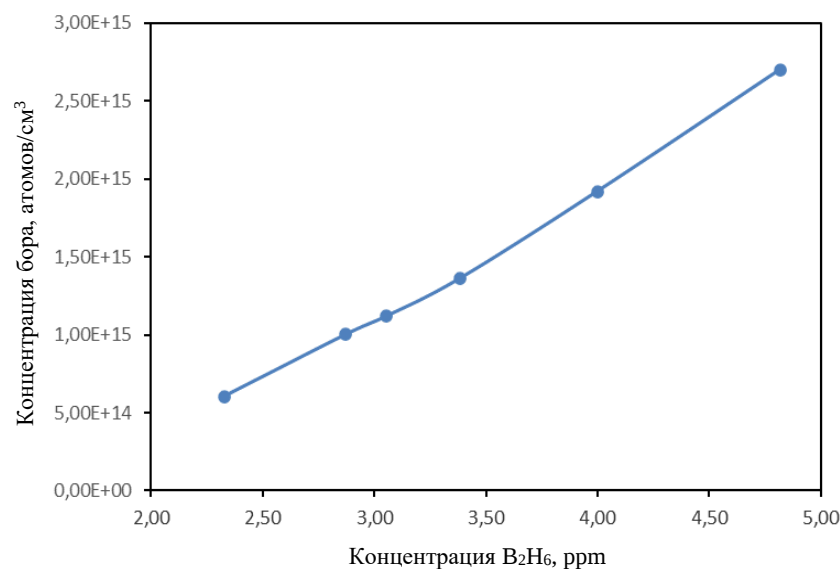


Рис. 5. Зависимость концентрации бора в эпитаксиальной пленке от температуры осаждения

Как видно из рис. 4, концентрация бора в эпитаксиальных слоях кремния монотонно линейно возрастает от $6,06 \times 10^{14}$ до $2,70 \times 10^{15}$ атомов/см³ с увеличением концентрации диборана в газовой смеси от 2,33 до 4,82 ppm (что соответствует изменению удельного сопротивления от 21,85 до 5,0 Ом×см).

В то же время, при концентрации диборана в газовой смеси 3,3 ppm концентрация бора в эпитаксиальных слоях кремния монотонно возрастает от $4,60 \times 10^{14}$ до $1,03 \times 10^{15}$ атомов/см³ с увеличением температуры осаждения от 1040 °C до 1080 °C (рис. 5). При этом, в интервале температур от 1060 до 1080 °C увеличение происходит более резко, чем в интервале температур от 1040 °C до 1060 °C.

Поэтому с точки зрения управляемости процессом по концентрации бора целесообразно проводить наращивание эпитаксиальных слоев кремния при температуре не выше 1060 °С.

Что касается однородности легирования эпитаксиальных пленок, то однородность удельного сопротивления по пластине не превышала $\leq \pm 3,2$ %, по загрузке $\leq \pm 4,5$ %. Высокая однородность удельного сопротивления эпитаксиальных пленок свидетельствует о равномерном распределении температуры по подложкодержателю.

Заключение

Проведено исследование процесса эпитаксиального наращивания слоев кремния, легированных бором, в низкопрофильном горизонтальном реакторе с плоским подложкодержателем в системе трихлосилан-водород-диборанна на пластинах диаметром 200 мм.

Определены режимы эпитаксиального наращивания кремния, обеспечивающие формирование эпитаксиальных пленок кремния со скоростью роста от 1,0 до 2,0 мкм/мин с однородностью толщины не хуже $\pm 2,0$ % и с удельным сопротивлением в диапазоне от 5,0 до 21,85 Ом×см.

Показано, что с точки зрения управляемости процессом по концентрации бора целесообразно проводить наращивание эпитаксиальных слоев кремния при температуре не выше 1060 °С.

Библиографические ссылки

1. Емельянов В. А., Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем / В. А. Емельянов, А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко – Минск: Интегралполиграф, 2008. 286 с.
2. Hammond M. L. Silicon Epitaxy by Chemical Vapor Deposition in Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques / Ed. by K. Seshan. – Noyes Publications; 2 edition, 2001. 430 p.
3. Nonlinear increase in silicon epitaxial growth rate in a SiHC1₃-H₂ system under atmospheric pressure / H. Habuka [et al.] // Journal of Crystal Growth. 1997. Vol. 182. P. 352–362.
4. Robinson M. D., Silicon Epitaxy in Microelectronics Materials and Processes // Ed. By R.A. Levy.- New York: by Kluwer Academic Publishers, 1989. P. 25–78.
5. Технология СБИС : в 2-х кн. / под ред. С. Зи. – М. : Мир, 1986. Кн. 1. С. 74–120.