

так как в конструкции отсутствует шторка, блокирующая часть светового потока.

- Потери света на отражение будут несколько уменьшены путем применения полного внутреннего отражения в деталях вторичной оптики.

- За счет более полного использования светового потока можно будет уменьшить ток инжекции светодиода и таким образом понизить его температуру, что позволит не использовать принудительное активное охлаждение и улучшить надежность изделия.

- Масса изделия будет меньше за счет отказа от активного охлаждения и массивной проекционной линзы из стекла.

### Литература

1. Ulrich, L. Audi Pixelated Laser Headlights Light the Road and Paint It Too / L. Ulrich // IEEE Spectrum [Electronic resource]. – 2015.

2. Bhardwaj, Ju. Advanced LED technology for automotive applications / Ju Bhardwaj, R. Peddada, B. Spinger // SPIE [Electronic resource]. – 2017.

УДК 621.382.002

## ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOC ИОННО–ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ СОСТАВНОЙ МИШЕНИ SiO<sub>2</sub>/C

Телеш Е.В., Дуксин М.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Бурное развитие различных областей радиоэлектроники, характерное для последних десятилетий, связаны с поиском новых материалов и разработкой технологии получения изделий на их основе. Это касается и диэлектриков – требуется применения для межуровневой изоляции диэлектрических слоёв с низким значением диэлектрической проницаемости. Это необходимо для уменьшения потребляемой мощности и увеличения быстродействия в сверхбольших интегральных схемах с размерами элементов менее 0,1 мкм [1]. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их углеродом [2]. Углеродсодержащие диэлектрические покрытия чаще всего получают методом химического осаждения из газовой фазы, однако это связано с определёнными трудностями. Такие плёнки сильно адсорбируют воду, что является недопустимым для межуровневого диэлектрика.

В данной работе плёнки SiOC формировались ионно–лучевым распылением составной мишени SiO<sub>2</sub>/12,5 %C. Распыляемая мишень представляла собой диск из кварца высокой чистоты (ТУ0284409–108–85) диаметром 60 мм и толщиной 4 мм. В кварце был вырезан сегмент, вместо которого был помещен одинаковый по площади фрагмент из плотного графита высокой чистоты марки МПГ-7 ТУ 1915-051-00200851-2005 (рисунок 1).

Нанесение пленок осуществлялось в модернизированной установке вакуумного напыления УРМ 3.279.017, оснащённой ионно–лучевым источником на основе ускорителя с анодным слоем. Остаточный вакуум не превышал  $4,2 \cdot 10^{-3}$  Па. Рабочими газами служили аргон и кислород. Плёнки формировались на подложках из стекла К8, кремния и кремния, покрытого пленкой никеля. Толщина покрытий определялась с помо-

щью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Компенсация положительного заряда на мишени осуществлялась термоэлектронами. Электрофизические характеристики покрытий исследовались с применением МДМ–структур. Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись на частоте 1 МГц с помощью прибора Е7-20, а пробивное напряжение с применением характеристикиграфа TR-4805.

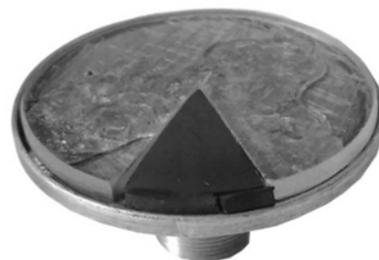


Рисунок 1 – Внешний вид составной мишени SiO<sub>2</sub>/12,5 %C

Толщина пленок составляла 270–300 нм, скорость нанесения – 0,77 нм/с, ускоряющее напряжение – 3,0 кВ, ток термокомпенсатора – 12 А. Режимы нанесения покрытий и результаты измерений электрофизических характеристик пленок представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы нанесения покрытий и результаты измерений электрофизических характеристик пленок SiOC

Po <sub>2</sub> , Па	T <sub>н</sub> , К	ρ <sub>v</sub> , Ом·м	tgδ	ε	E <sub>пр</sub> , В/см
–	343	37·10 <sup>3</sup>	0,031	4,0	8,13·10 <sup>6</sup>
8,0·10 <sup>-3</sup>	343	70·10 <sup>3</sup>	0,025	3,8	6,86·10 <sup>6</sup>
1,4·10 <sup>-2</sup>	343	83·10 <sup>3</sup>	0,034	3,8	9,43·10 <sup>6</sup>
–	403	64·10 <sup>3</sup>	0,025	4,0	6,50·10 <sup>6</sup>
–	493	50·10 <sup>3</sup>	0,029	4,1	7,26·10 <sup>6</sup>
–	583	37·10 <sup>3</sup>	0,032	4,2	6,29·10 <sup>6</sup>

Установлено, что добавка кислорода к аргону способствует некоторому снижению величины диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ , увеличению электрической прочности и удельного объемного сопротивления. Повышение температуры подложки привело к увеличению  $\epsilon$ , снижению удельного объемного сопротивления и электрической прочности.

Установлено, что концентрация углерода в пленке недостаточна для существенного снижения диэлектрической проницаемости. Поэтому необходимо увеличить площадь графитового сегмента до 20–25 %.

На рисунках 2–3 приведены спектральные зависимости пропускания и поглощения пленок SiOC, полученных при разных режимах.

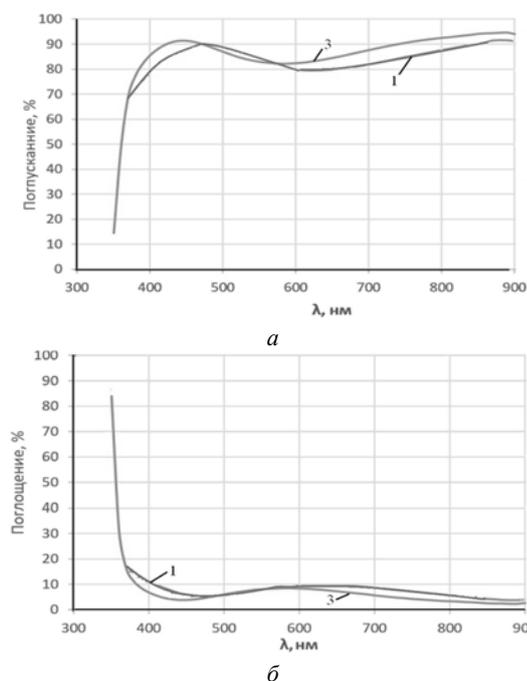


Рисунок 2 – Спектральные зависимости пропускания (а) и поглощения (б) пленок SiOC, полученных при разных давлениях кислорода

На рисунке 4 представлены ИК спектры пропускания пленок SiOC, полученных при разных режимах. На спектре имеются следующие три характерные полосы поглощения SiO<sub>2</sub>:  $\nu_{as} = 1085 \text{ см}^{-1}$ , соответствующую валентным антисимметричным колебаниям Si ←→ O ← Si,  $\nu_s = 820 \text{ см}^{-1}$ , соответствующую валентным симметричным колебаниям Si → O ← Si,  $\delta_{as} = 450 \text{ см}^{-1}$ , соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям Si – O – Si. Также на спектре имеется четко выраженная полоса поглощения кремниевой подложки с частотой ~ 607 см<sup>-1</sup>.

Добавка кислорода к аргону позволила несколько увеличить пропускание и снизить поглощение в ближнем ИК диапазоне. Нагрев подложки способствовал росту пропускания в видимом диапазоне (500–600 нм).

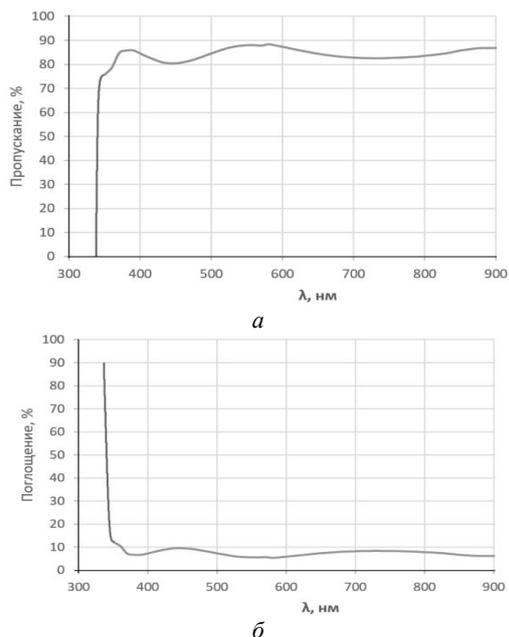


Рисунок 3 – Спектральные зависимости пропускания (а) и поглощения (б) пленки SiOC, полученной при температуре подложки 583 К

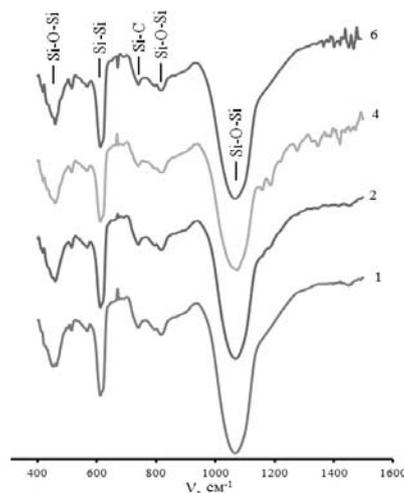


Рисунок 4 – ИК спектры пропускания пленок SiOC, полученных при различных режимах

Установлено наличие полосы поглощения карбида кремния Si–C на частоте ~ 740 см<sup>-1</sup>. Поглощения на  $\nu = 1020\text{--}1090 \text{ см}^{-1}$  связи Si–O–C (оксикарбид кремния) обнаружено не было.

### Литература

1. Murarka, S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application / S.P. Murarka // Solid State Technology. – 1996. – № 3. – P. 83–89.
2. Kim, H.J. Characterization of low-dielectric-constant SiOC thin films deposited by PECVD for interlayer dielectrics of multilevel interconnections / H.J. Kim, Q. Shao, Y-H. Kim // Surface and Coatings Technology. – 2003. – V. 171. – P. 39–45.