

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМЫ  
Re(10  $\bar{1}$  0)-C****А.К.ОРУДЖОВ, А.О.ДАШДЕМИРОВ, Ю.Г.НУРУЛЛАЕВ  
Бакинский Государственный Университет**

*На основе измерений термоэлектронного тока и тока ионов, образующихся путем поверхностной ионизации молекул CsCl в системе Re(10  $\bar{1}$  0)-C, выявлено, что на поверхности рения в зависимости от температуры выдержки и давления C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> может образоваться монослой и толстый слой углерода. Обнаружено, что при диффузии атомов углерода в объем рения его электрическое сопротивление и яркостная температура изменяется.*

Изучение физических свойств системы Rh-C, Re-C начаты в работах [1, 2] и были использованы проволочные материалы. В этой работе были использованы материалы в виде ленты. Изучение электрофизических свойств системы Re-C методами каталитической диссоциации молекул CsCl и термоэлектронной эмиссии ТЭЭ показали, что при насыщении атомами углерода, нагретой до T≤1800 К рениевой ленты в парах бензола и при последующем понижении температуры на рениевой ленте, образуется монослой графита, а при насыщении нагретого до T≥1900 К рения в парах бензола (P<sub>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></sub>=10<sup>-3</sup>тор) и при последующем понижении температуры до T≤1600 К на рениевой ленте образуется толстая пленка графита. Электрические и оптические свойства рения с монослоем и толстым слоем графита сильно различаются.

**Экспериментальные результаты и их обсуждение**

В качестве образца была использована рениевая лента с размерами 50x1,5x0,02мм<sup>3</sup> (лента была поликристаллическая). Рекристаллизация рениевой ленты производили при T=2300÷2400 К путем нагревания на переменном токе в течение нескольких часов. После тепловой обработки рекристаллизованная рениевая лента становилась однородной по работе выхода (отсутствовал аномальный электронный эффект Шоттки). Работа выхода рекристаллизованной рениевой ленты определялась по методу поверхностной ионизации трудноионизируемого индия и по ТЭЭ

( $e\varphi=5,17\pm 0,03\text{эВ}$ ). Оба способа определения работы выхода дали практически совпадающие результаты, что соответствует работе выхода грани  $(10\bar{1}0)$  рения [3]. Сопротивление рекристаллизованной рениевой ленты было  $R_{20}^0\text{с}=0,29$  Ом. После получения грани  $(10\bar{1}0)$  Re, ленту нагретую до  $T=1600$  К выдерживали в парах бензола с давлением  $P_{\text{C}_6\text{H}_6}=2\cdot 10^{-5}$  тор. Для получения монослоя графита на поверхности рения, как и в случае поликристаллической рениевой проволоки, атомы углерода, образуемые из разложения молекул бензола на нагретой поверхности рениевой ленты, диффундировали в объем рения до тех пор пока концентрация атомов углерода не увеличивалась до концентрации предельной растворимости при данной температуре, после чего на поверхности грани  $(10\bar{1}0)\text{Re}$  образовывался монослой графита. Об образовании монослоя графита на Re судили по измерению токов ПИ молекул CsCl и ТЭЭ, как и в случае образования монослоя графита на рениевой проволоке. Этот процесс потребовал  $\sim 1,5$  час времени. Сопротивление  $R_{20}^0\text{с}$  при этом увеличивалось от 0,29 Ом до 0,46 Ом. Как известно, характерными признаками образования монослоя графита на металле (М) (Ir,Rh,Re) являются уменьшение коэффициента диссоциации молекул CsCl от единицы для чистой поверхности до  $\sim 10^{-3}\div 10^{-5}$  для М-С и изменение работы выхода металла до  $\sim 4,5$  эВ. Эти характеристики системы М-С нами были использованы и при изучении Re-С (рис.1 и рис.2). После насыщения объема рения атомами углерода до предельной концентрации при данной температуре, как и в случае поликристаллической рениевой проволоки, при повышении температуры грани  $(10\bar{1}0)$  Re на  $\Delta T=50\div 100$  К от температуры растворения углерода ( $T=1600\text{К}$ ) поверхность рения от монослоя графита освобождалась, т.е. атомы углерода растворялись в объем рения. После этих процессов при данном токе накала большей, чем ток накала соответствующей  $T=1600\text{К}$  ток ТЭЭ от чистой поверхности по сравнению до диффузии углерода, несколько уменьшался. Это связано с уменьшением температуры, которое можно объяснить увеличением интегрального коэффициента черноты излучения системы Re-С. Так как в результате диффузии углерода в рений его сопротивление заметно увеличивалось, то при данном токе накала должна увеличиваться выделяемая мощность  $W = I^2 R$ . Уменьшение температуры рения можно было найти из сравнения токов ТЭЭ от чистой поверхности до и после диффузии углерода в рений из формулы Ричардсона. Определение работы выхода Re ленты показало, что в результате диффузии углерода работа выхода рения не меняется, т.е. перестройка грани  $(10\bar{1}0)$  не происходит. Изменение интегрального коэффициента черноты излучения можно было оценить из сравнения двух значений тока накала, соответствующие одинаковой температуре (т.е. одиночного тока ТЭЭ) из Re до и после диффузии углерода. Так как при высоких температурах

мощность тока выделяется в основном в виде излучения, то можно написать  $W = I^2 R \cong \varepsilon_T \sigma T^4$ , поэтому из условия  $T = \text{const}$  получим

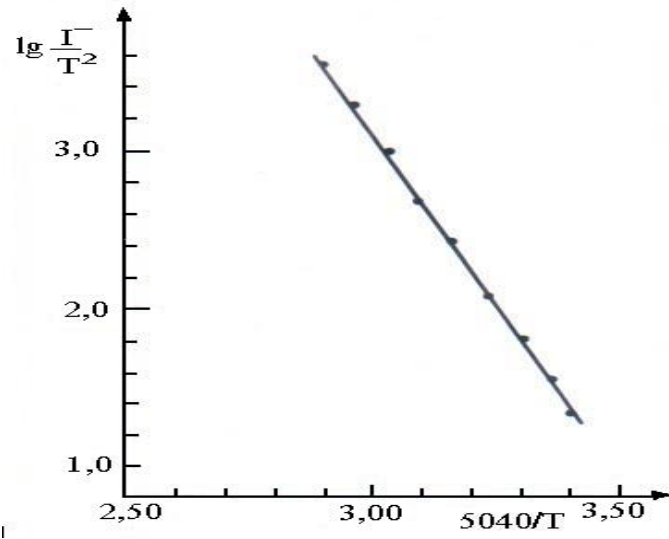


Рис. 1. График Ричардсона для грани (10  $\bar{1}$  0) рения с монослоем графита.

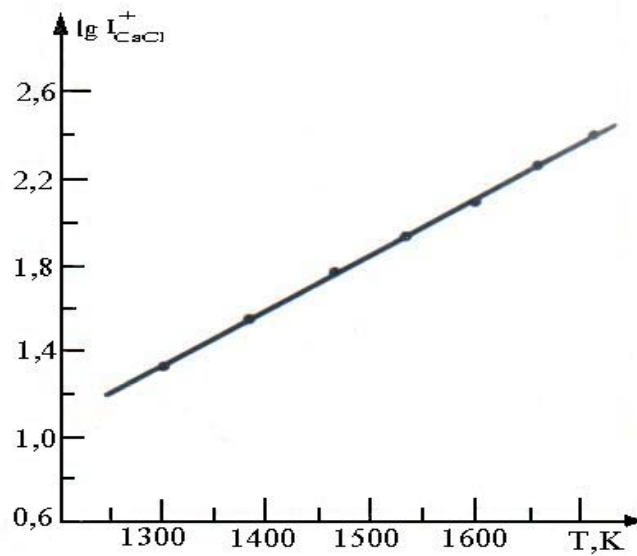
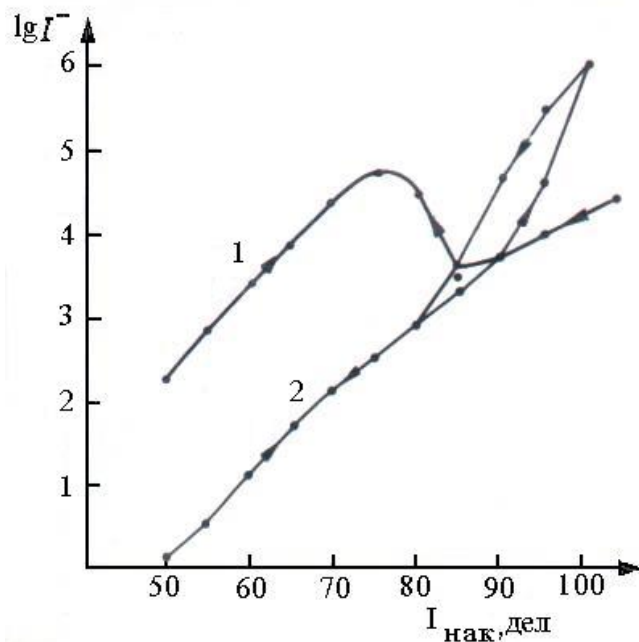


Рис. 2. Зависимость  $\lg I_{CsCl}^+ = f(T)$  при поверхностной ионизации молекул CsCl на поверхности рениевой ленты с монослоем графита.

$$\frac{\varepsilon_{T_1}}{\varepsilon_{T_0}} \approx \left(\frac{I_1}{I_0}\right)^2 \cdot \frac{R_1}{R_0}, \quad (1)$$

где,  $\varepsilon_{T_1}$  и  $\varepsilon_{T_0}$  интегральные коэффициенты черноты излучения,  $I_1$  и  $I_0$  токи ТЭЭ,  $R_1$  и  $R_0$  электрическое сопротивление после и до диффузии соответственно.



**Рис. 3.** Зависимость тока термоэлектронной эмиссии от тока накала для рения с монослоем графита (1) и для рения с толстым слоем графита (2)

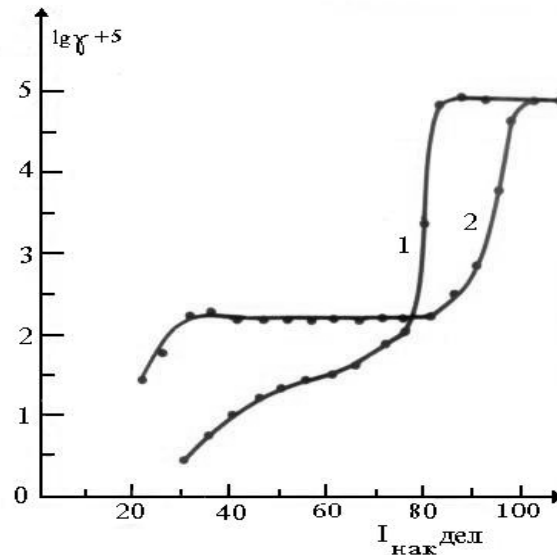
При насыщении рения углеродом при  $T=1700$  К в парах бензола давлением  $P_{C_6H_6}=5 \cdot 10^{-5}$  тор, сопротивление рения  $R_{20}^0$  увеличивалось от 0,29 Ом до 0,52 Ом, а отношение сопротивлений и токов была соответственно  $R_1/R_0=1,79$ ,  $I_1/I_0=1,01$ . Тогда зная  $\varepsilon_T \cong 0,20$  чистого рения при  $T=1600$ К можно было найти  $\varepsilon_{T_1}$  для Re (10  $\bar{1}$  0)-С, который получился  $\varepsilon_{T_1} \cong 0,36$ . При понижении температуры рениевой ленты насыщенный углеродом при  $T \leq 1800$  К температурные зависимости токов ТЭЭ и ПИ молекул CsCl были характерными для соответствующих температурных зависимостей на поверхности системы металл-монослой графита (рис.1и 2). С другой стороны известно, что концентрация предельной растворимости зависит от температуры и с понижением  $T$  она должна уменьшатся. Тогда возникает

вопрос об уходе «избыточных» атомов углерода при понижении температуры рения. Так как при понижении температуры рениевой ленты насыщенная углеродными атомами объемный фазовый переход атомов углерода не происходит, то надо полагать, что «избыточные» атомы углерода должны десорбироваться из системы Re-C. Действительно, валентные связи атомов с поверхностью монослоя графита на металле являются сильно ослабленными, поэтому можно считать, что атомы углерода диффундирующие из объема рения к поверхности в относительно малом количестве прежде чем образовывать структурные единицы монослоя графита – шестиугольников, атомы углерода с поверхности Re-C десорбируются и поэтому толстого слоя графита не образуют. При насыщении нагретого до  $T=1900$  К рения атомами углерода в парах бензола с давлением  $P_{C_6H_6}=5 \cdot 10^{-3}$  тор сопротивление рения  $R_{20}^{\circ C}$  увеличивалось от 0,29 Ом до 0,66 Ом т.е.  $\sim 2,3$  раза. После насыщения рения углеродом в этих условиях при понижении температуры производили измерения зависимости токов ТЭЭ и ПИ молекул CsCl от тока накала рениевой ленты (рис.3 и рис.4, кривые 2). Эти зависимости сильно отличались от аналогичных зависимостей в случае насыщения углеродом при температурах  $T \leq 1800$  К (рис.3 и 4, кривые 1). Зависимость коэффициента диссоциации  $\gamma$  молекул CsCl от тока накала  $I$  кривая 2 на рис.4 мы относим к образованию толстого слоя графита на Re при понижении температуры от температуры экспозиции  $T \geq 1900$  К рения в парах бензола с давлением  $P_{C_6H_6}=5 \cdot 10^{-3}$  тор. Кривая 2 на рис.4 была получена следующим образом. После экспозиции рения в парах бензола, в вышеуказанных условиях, ток накала Re уменьшался до нуля и после выдержки при комнатной температуре определенное время, ток накала Re постепенно увеличивали и измеряли ток ПИ молекул CsCl из которого был вычислен коэффициент диссоциации молекул CsCl  $\gamma = \frac{I^+}{I_0}$ . При увеличении тока накала рения до тока накала экспозиции (90 дел) кривая 2 в прямом и обратном направлениях совпадали. При  $I > 90$  дел. резкое увеличение  $\gamma$  на рис.4 объясняется освобождением поверхности Re от графита (диффузия в Re и десорбция с поверхности Re атомов углерода). В пользу получения толстого слоя графита на рении свидетельствовала зависимость тока ТЭЭ от тока накала рения при понижении тока накала Re от величины тока накала экспозиции ( $I \geq 90$  дел.) рения в парах бензола с давлением  $P_{C_6H_6}=5 \cdot 10^{-3}$  тор (рис.3 кривая 2). Значение токов ТЭЭ с графитового слоя на Re по сравнению с токами ТЭЭ при низкотемпературном ( $T < 1800$  К) насыщении Re атомами углерода (монослой графита на рении) уменьшились в  $\sim 150 \div 200$  раз в одинаковых значениях токов накала. Это можно было объяснить уменьшением температуры рениевой ленты, из-за увеличения коэффициента черноты излучения Re с толстым слоем графита. Действительно, в результате высокотемпературного

( $T > 1900$  К) насыщения рения углеродом  $R_{20}^0$  с рения увеличивается в  $\sim 2,3$  раза. При этом мощность тока накала для данного значения не может уменьшаться. Так как при высоких температурах мощность в основном выделяется в виде излучения, то  $W = I^2 R \cong \varepsilon_T \sigma T^4$ . Отсюда видно, что из-за увеличения  $\varepsilon_T$ , температура должна уменьшаться, а интегральный коэффициент черноты излучения рения с толстым слоем графита можно оценить из сравнения мощностей токов накала рения с монослойными и толстыми слоями графита для  $T = const$ , т.е. одинакового значения токов термоэлектронной эмиссии. Из этого условия получим

$$\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_{T_1}} \cong \left( \frac{I}{I_1} \right)^2 \cdot \frac{R}{R_1},$$

где  $\frac{R}{R_1} = \frac{0,66}{0,52} = 1,27$  и  $\frac{I}{I_1} \cong 1,4$ ,  $\varepsilon_{T_1} \approx 0,36$



**Рис. 4.** Графики зависимостей коэффициента диссоциации молекул CsCl от тока накала на рениевой ленте с монослоем графита (1) и на рениевой ленте с толстым слоем графита (2).

Отсюда для  $\varepsilon_T$  было найдено значение  $\sim 0,9$ . На рисунке 5 показана зависимость тока накала  $I^*$  рения с монослойным покрытием от тока накала  $I$  рения с толстым слоем графита соответствующие одинаковым значениям токов ТЭЭ (температуры). Так как зависимость  $I^*$  от  $T$  известна (рис.6), то из графиков на рис.5 и 6 можно было найти температуры соответствующие

щие различным значениям тока накала рения с толстым слоем графита. Измерения яркостной температуры  $Re$  с толстым слоем графита показало, что они при одинаковых токах накала по сравнению яркостной температуры  $Re$  с монослойным покрытием на  $\sim 180K$  уменьшались. На рис.7 показан график зависимости яркостной температуры от тока накала  $I$  рения с толстым слоем графита. Как следует из рис.7 при понижении тока накала от 90 дел. до 60 дел., а затем при последующем повышении до  $I_{нак}=90$  дел. яркостная температура  $Re-C$  в прямом и обратном направлениях совпадает. После этого, при увеличении тока накала от  $I_{нак}=60$  дел. зависимость  $T_{я}=f(I_{нак})$  до  $I_{нак}=95$  дел. снова совпадает с первоначальной зависимостью, а при  $I_{2нак} > I_{1нак}=95$  дел. с ростом  $I_{нак}$  возрастает более сильно и при понижении  $I_{нак}$  от 100 дел. значения  $T_{я}$  становятся несколько выше, чем при первом цикле, а в районе  $I_{нак}=60$  дел. она снова совпадает с первоначальным значением. Отметим, что в области  $I_{нак}=(105\div 60)$  дел. при понижении  $I_{нак}$  наблюдается временная зависимость тока термоэлектронной эмиссии, так что с течением времени ток ТЭЭ уменьшается. Это означает, что с течением времени возрастает и в районе тока накала 60 дел.  $\epsilon_T$  имеет такое значение, как и для первоначального «толстого» слоя графита на рении. При повторном повышении  $I_{нак}$  до 110 дел. и при выдержке несколько минут (пока измеряется яркостная температура) с течением времени увеличивается и при обратном уменьшении тока накала до 60 дел. яркостная температура становится несколько выше чем для рения с «толстым» слоем графита, но несколько меньше чем для чистого рения. При дальнейшем повышении тока накала до 120 дел. яркостная температура увеличивается до значения для чистого рения и после выдержки несколько минут при последующем уменьшении тока накала зависимость  $T_{я}=f(I_{нак})$  совпадает аналогичной зависимостью для «чистого» рения. Отметим, что при этом в  $Re$  еще остаются в достаточном количестве атомы растворенного углерода, так что при малых значениях тока накала  $I_{нак}\leq 60$  дел. из-за диффузии из объема к поверхности, на рении образуется монослой графита, как это имело место после насыщения рения атомами углерода при  $T=1600$  К в парах бензола с давлением  $P_{C_6H_6}=2\cdot 10^{-5}$  тор. Из формулы связи между  $T$ ,  $T_{я}$  и  $\epsilon_{\lambda}$

$$\frac{1}{T_{я}} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{c_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda}}, \quad (2)$$

вычисляли спектральный коэффициент черноты  $\epsilon_{\lambda}$  рения с толстым слоем графита и было получено значение  $\epsilon_{\lambda}=0,83\pm 0,03$ . Это значение очень близко к значению  $\epsilon_{\lambda}$  графита [4].

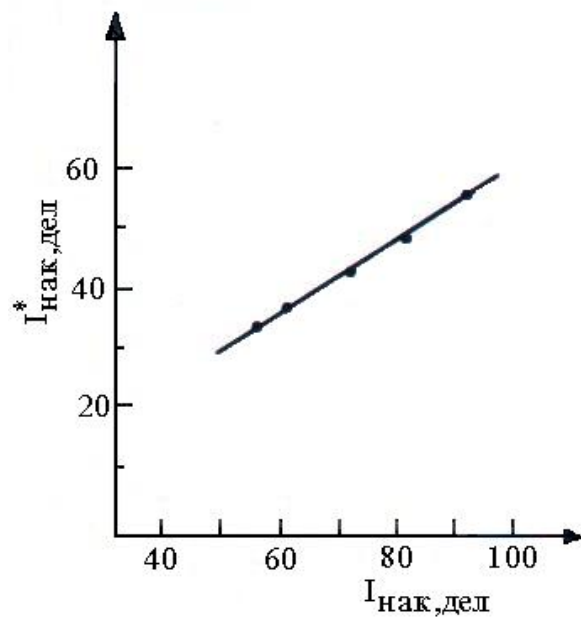


Рис. 5. Значение токов накала рения с монослоем графита ( $I_{нак}^*$ ) и с толстым слоем графита ( $I_{нак}$ ) соответствующие одинаковым температурам.

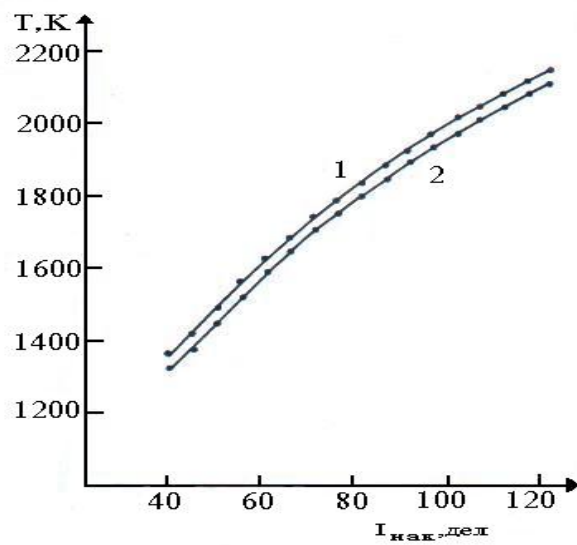


Рис. 6. Графики зависимостей температуры рениевой ленты (1) и рениевой ленты с монослоем графита (2) от тока накала.

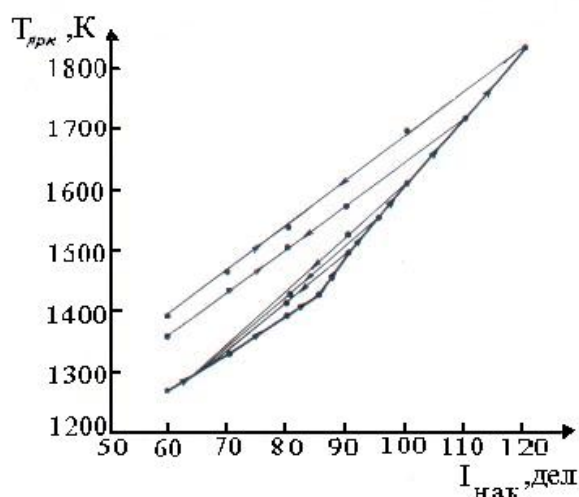


Рис. 7. График зависимости яркостной температуры рениевой ленты с покрытием графита от тока накала.

Путем выдержки рения при  $T \geq 2300$  К в течение  $\sim 1$  часа рений можно было очистить от основной доли растворенного углерода, так как после этой процедуры при понижении температуры в области измерения тока ТЭЭ образование углеродного покрытия на рении не наблюдалось. Насыщение рениевой ленты атомами углерода и ее очистки можно было многократно повторять. Выяснения вопроса об образовании монослойного или многослойного покрытия графита на рении было очень важно для изучения интеркалирования и диффузии атомов через промежуточный слой графита в рений [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А.Я.Тонтегоде, Р.М.Абдуллаев, Ф.К.Юсифов. Изучение диффузии внедрения атомов между поверхностью и объемом твердых тел. Диффузия углерода в рений. ЖТФ.1975.т.XLV вып.9.стр.1904-1914.
2. А.Я.Тонтегоде, Ф.К.Юсифов. ЖТФ.1973.т.XLIII вып.стр.1049
3. Ф.С.Фоменко. Эмиссионные свойства материалов. Киев, Наукова Думка, 1981, с.338
4. Физические величины. Справочник, Москва, Энергоиздат, 1991, с.1232
5. Н.Р.Галль, Е.В.Рутьков, А.Я.Тонтегоде, М.М.Усуфов. Интеркалирование атомами и молекулами двумерной графитовой пленки на металлах. ЖТФ. 1999. т.69, вып.9, стр.72-75.

## Re(10 $\bar{1}$ 0)-C SİSTEMİNİN ELEKTRİK VƏ OPTİK XASSƏLƏRİ

A.K.ÖRUCOV, A.O.DAŞDƏMİROV, Y.Q.NURULLAYEV

### ANNOTASIYA

Re(10 $\bar{1}$ 0)-C sistemində termoelektron cərəyanının və CsCl molekulunun səthi ionlaşmasına görə yaranan ion cərəyanının ölçülməsinə əsasən aşkar edilmişdir ki, benzolun təzyiqindən və lentin temperaturundan asılı olaraq rheniumun səthində mono və qalın karbon təbəqəsi yarana bilər. Müəyyən edilmişdir ki, karbon atomlarının rheniumun həcminə diffuziyası zamanı onun elektrik müqaviməti və parlaqlıq temperaturu dəyişir.

## ELECTRIC AND OPTIC ATTRIBUTES OF RE(10 $\bar{1}$ 0)-C SYSTEM

A.K.ÖRUJOV, A.O.DASHDEMİROV, V.G.NURULLAYEV

### ABSTRACT

On the base of measurements of thermoelectron current and current of ions, forming by surface ionization of CsCl molecules in the Re(10 $\bar{1}$ 0)-C system, it is found that, on the surface of rhenium in demand of temperature endurance and pressure of C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, it may be form monolayer and thick layer of carbon. It is found that, by diffusion of carbon atoms in capacity of rhenium. Its current resisting and vivid temperature changes.