

- [1] К о в а л е в Н.Ф., П е т е л и н М.И. Релятивистская высокочастотная электроника. М.: ИПФ АН СССР, Горький. 1981. В. 2. С. 62.
- [2] M a n g C.M., S p r a n g l e P. // Free - Electron Generators of Coherent Radiation, Phys. of Quant. Electr. 1982. V. 9. P. 627.
- [3] Г и н з б у р г Н.С., К о в а л е в Н.Ф. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 5. С. 234-237.
- [4] Г и н з б у р г Н.С., С е р г е е в А.С. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 3. С. 126-134.
- [5] Г и н з б у р г Н.С., С е р г е е в А.С. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 20. С. 1844-1849.
- [6] Б у г а е в С.П., К а н а в е ц В.И., К л и м о в А.И. и др. Релятивистская высокочастотная электроника. М.: ИПФ АН СССР, Горький. 1988. В. 5. С. 78.
- [7] П а л о ч И., О л и н е р А. Квазиоптика. М.: Мир, 1966. 167 с.
- [8] В а й н ш т е й н Л.А., С о л н ц е в В.А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М.: Сов. радио, 1973. 339 с.

Институт прикладной физики  
АН СССР, Горький

Поступило в Редакцию  
7 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 18

26 сентября 1990 г.

04

© 1990

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПЛЕНОК NbN

Я. Б и д з и н ь с к и, Е. К. Г о л ь м а н,  
А. Г. З а й ц е в

Примером реализации процесса реактивного магнетронного распыления может служить получение сверхпроводящих тонких пленок нитрида ниобия [1, 2]. Основными параметрами разряда в системе магнетронного распыления, определяющими свойства осаждаемых покрытий, являются, в данном случае, ток разряда ( $I$ ), давление рабочего газа ( $P$ ) и его состав, характеризуемый отношением парциальных давлений аргона и азота. Поиск оптимальных условий осаждения пленок сводится к последовательному перебору комбинаций указанных параметров.

Цель настоящей работы – представить результаты исследования, показывающие, что при практически произвольном задании любых

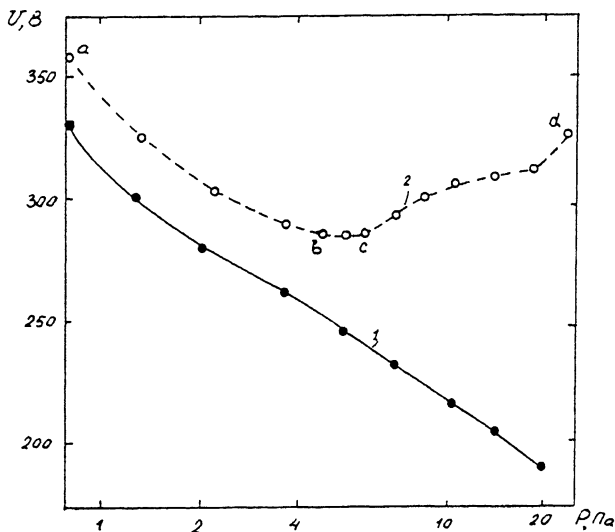


Рис. 1. Зависимость напряжения разряда от давления рабочего газа при токе разряда  $I=3$  А: 1 – распыление в  $Ar$ , 2 – распыление в смеси  $Ar-N$ .

двух из указанных параметров, третий может быть однозначно определен на основании анализа зависимости напряжения разряда от давления смеси газов при постоянном токе разряда.

В работе использовалась система магнетронного распыления, описанная ранее [2].

На рис. 1, 2 представлены характерные зависимости напряжения разряда ( $U$ ) от давления рабочего газа при  $I=const$ , снятые при распылении ниобиевой мишени как в чистом  $Ar$ , так и в смеси  $Ar-N_2$  ( $P_{Ar}/P_{N_2}=3.2$ ). Ток разряда варьировался в пределах 0.25 – 3 А, давление рабочего газа – в пределах 0.7 – 17 Па. При распылении в чистом  $Ar$  (см. рис. 1) напряжение разряда монотонно возрастает с уменьшением давления газа во всем диапазоне измерений. Напротив, при распылении в смеси аргон-азот на кривых  $U(P)$  можно выделить несколько характерных участков (см. рис. 1, 2):  $a-b$  – уменьшение  $U$  с ростом  $P$  подобно тому, как это имело место при распылении в чистом  $Ar$ ;  $c-d$  – нерегулярное изменение  $U$  с увеличением  $P$ ;  $b-c$  – промежуточный участок, в пределах которого  $U$  практически не зависит от  $P$ . Уменьшение значения  $I$  сдвигает точки  $b$  и  $c$  в сторону меньших давлений (см. рис. 1, 2). Так, кривые  $U(P)|_{I=const}$ , снятые для  $I=0.25-0.5$  А, состояли уже только из участка  $a-b$ .

Параллельно с измерениями зависимостей  $U(P)$  при распылении в атмосфере смеси проводилось осаждение тонких пленок нитрида ниобия на подложки из слюды, нагретые до температуры

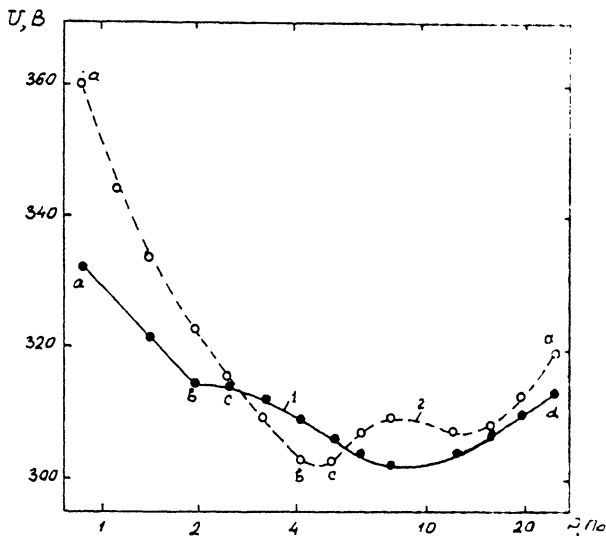


Рис. 2. Зависимость напряжения разряда от давления рабочего газа при распылении в смеси  $Ar-N$ : 1, -  $I=1$  А, 2 -  $I=2$  А.

в  $380^\circ\text{C}$ , и на подложки из поликора, нагретые до температуры в  $500^\circ\text{C}$ .

Исследование электрофизических свойств полученных покрытий показало, что сверхпроводящие пленки  $NbN$  с критической температурой  $T_c = 14 - 15$  К могут быть получены при произвольном выборе значения тока разряда, если давление смеси выбрано в пределах участка  $b-c$  соответствующей кривой  $U(P)|_{I=const}$ . Структурные и электрофизические свойства этих пленок, вне зависимости от конкретного сочетания  $I-P$ , практически идентичны свойствам пленок  $NbN$ , полученных в работе [2]. Выбор значений  $P$  за пределами участка  $b-c$  не позволил получить пленок  $NbN$  со столь высокими значениями  $T_c$ .

Полученные результаты могут быть объяснены с точки зрения исследования разряда в системе магнетронного распыления [3], показывающего, что при неизменном составе рабочего газа отклонения от монотонного роста напряжения разряда с уменьшением давления могут быть связаны с изменениями второго коэффициента Таунсенда, т.е. с изменением состава поверхности мишени. Таким образом, сходные по виду участки зависимостей  $U(P)$ , снятых при различных значениях  $I$ , должны соответствовать одинаковому составу поверхности распыляемой мишени. В этом случае подтверждается сделанный в работе [4] вывод о том, что в процессе реактивного магнетронного напыления пленок  $NbN$ , нитрид ниобия образуется преимущественно на поверхности распыляемой ниобиевой мишени.

В заключение можно отметить следующее: а) существует множество „оптимальных“ режимов осаждения тонких пленок  $NbN$  методом реактивного магнетронного распыления (эти режимы соответствуют различным сочетаниям  $I - (P_{Ar}/P_{N_2}) - P$  и обеспечивают получение пленок с идентичными сверхпроводящими свойствами); б) в случае, если обнаружен один из этих режимов, другие могут быть однозначно предсказаны по кривым  $U(P)|_{I=const}$ , снятым для данного состава рабочего газа; в) не исключено, что настоящие выводы распространяются на реактивное магнетронное напыление не только  $NbN$ , но и других веществ.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] T h a k o o r S., L a m b J.L., T h a k o o r A.P., K h a n n a S.K. // J. Appl. Phys. 1985. V. 58. N 12. P. 4643-4648.
- [2] Бидзиньски Я., Гольман Е.К., Запцев А.Г., Козырев А.Б., Ушаков С.Н. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 16. С. 73-76.
- [3] S z e k a j D., H o l l m a n n E.K., K o z i r e v A.B., V o l p y a s V.A., Z a y t s e v A.G. // Appl. Phys. A. 1989. V. A49. P. 269-272.
- [4] V a n D o v e r R.B., B a c o n D.D., S i n c l a i r W.R. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1984. V. 2., N 3. P. 1257-1260.

Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию  
10 мая 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 18  
07; 04

26 сентября 1990 г.

© 1990

#### КОЛЛЕКТИВНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗРЯД В ВАКУУМНОМ ЗОЛЕ

Ю.М. С о р о к и н

1. Как специфика взаимодействия лазерного излучения с твердой поверхностью, так и процессы плазмообразования в аэрозоле в значительной степени определяются присутствием буферного газа. В первом случае рост давления газа может подавлять эрозию поверхности, увеличивать время жизни плазмы, менять механизмы инициирования приповерхностного пробоя [1]. Влияние буферного газа на спектр приповерхностной плазмы существенно зависит от режима облучения поверхности [2]. В аэрозоле „эффект поршня“,